

AALTO YLIOPISTO

Insinööritieteiden korkeakoulu

Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma

Rakennusmateriaalit ja tuotantotekniikka

KLAUS VILJANEN

KATON POLYVINYYLIKLORIDIKATTEEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN
TARKASTELU KENTTÄKOKEELLA JA LASKENNALLISESTI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 14. helmikuuta 2012

Valvoja: Professori Jari Puttonen Aalto-yliopisto

Ohjaaja: DI Ari-Veikko Kettunen Vahanen Oy

AALTO-YLIOPISTO TEKNIIKAN KORKEAKOULUT PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Klaus Viljanen			
Työn nimi: Katon polyvinyylikloridikatteen kosteusteknisen toiminnan tarkastelu kenttäkokeella ja laskennallisesti			
Korkeakoulu: Aalto yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Rakennustekniikan laitos			
Professori: Talonrakennustekniikka		Koodi: Rak-43	
Työn valvoja: Professori Jari Puttonen Työn ohjaaja: DI Ari-Veikko Kettunen			
<p>Työssä tutkittiin polyvinyylikloridilla (PVC) katetun loivan katon kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, onko diffuusio riittävä kuivumismekanismi, vai tulisiko PVC-katoissa käyttää tuuletusurallisia lämmöneristeitä. Osatavoitteena oli lisätä ymmärrystä PVC-katossa tapahtuvista kosteudenliikkeistä.</p> <p>Kenttäkokeessa mitattiin suhteellista kosteutta ja lämpötilaa Etelä-Suomessa sijaitsevan rakennuksen katon lämmöneristeestä. Tuulettamaton tai pelkillä alipainetuulettimilla tuuletettu katto ei pystynyt 8 kuukauden tutkimusaikana kuivaamaan katon rakennuskosteutta 0,35 kg vettä katonneliölle. Uratuuletus on toimintavarmoin tuuletusratkaisu ja pystyy poistamaan kosteutta nopeammin kuin muut tuuletusratkaisut. Uratuuletettu katto oli kuivin tutkituista katoista. Tutkimuksissa ilmeni, että katossa oleva ylimääräinen kosteus on jiirissä vetenä ja että suuret yhtenäiset kattopinnat siirtävät vettä jiiristä muulle katon alueelle katteen hulmutessa tuulella. Kosteus liikkuu katossa voimakkaasti pysty- ja vaakasuunnassa lämpötilaerojen vaikutuksesta, mitä voidaan alentaa esimerkiksi vaalealla PVC-katteella, muttei täysin estää. Lämpötilaerojen voimakas vaikutus rakenteiden kosteudenliikkeisiin tulee huomioda myös muissa rakenteissa kuten seinissä ja alapohjissa.</p> <p>Laskennallisen tarkastelun perusteella katevuodot ja konvektio voivat siirtää kattoon merkittävästi kosteutta, mutta diffuusiolla siirtyvät kosteusvirrat ovat pieniä, enimmillään 0,17 kg/m² vuodessa. Diffuusiolla tapahtuva kuivumisnopeus on noin 0,25 kg/m² vuodessa ja uratuuletuksella 1 - 16 kg/m² vuodessa. Tulokset vastasivat aiempia tutkimuksia. Laskennallisessa tarkastelussa hyödynnettiin kenttämittauksessa mitattuja tuloksia, mikä lisää tulosten pätevyyttä.</p> <p>Elementtimenetelmään perustuvalla laskennalla mallinnettiin kenttätutkimuksen kattorakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Mallinnuksessa huomioitiin hystereesi ja sorptiokäyrän lämpötilariippuvuus. Lämpötilariippuva sorptiokäyrä paransi hieman kosteudensiirtymisen tarkkuutta. Kuivumislaskelmissa voidaan tulosten perusteella käyttää yksinkertaista sorptiokäyrää. Kuivumislaskelmien perusteella PVC-katon hygroskooppinen kosteus kuivuu diffuusiolla 1 - 1,5 vuodessa. EPS:llä lämmöneristetyillä katoilla pystysuora kosteudenliike on vähäisempää kuin kivivillalla.</p> <p>Tutkimus tehtiin pääasiassa kivivillalla eristetyille PVC-katolle, mutta tuloksia voidaan soveltaa tapauskohtaisesti muilla lämmöneristeillä eristettyihin kattoihin. Kenttäkoe sisälsi sekä kesä- että talviajan mittaustuloksia, joten tuloksissa on havaittavissa katon käyttäytyminen eri vuodenaikoina. Tutkimusalueiden pinta-alat olivat 200 - 400 m², mikä saattoi alentaa kattojen kermin hulmuamisesta johtuvaa kosteuden tasaantumista. Kuivumisnopeuden riittävyyden arvioimiseksi tarvitaan lisätietoa kivivillaeristeiden pitkäaikaisesta kosteudenkestävyydestä.</p>			
Päivämäärä: 14.2.2012		Kieli: Suomi	
		Sivumäärä: 131 + liitteet 16	
Avainsanat: PVC, polyvinyylikloridi, katto, rakennusfysiikka, kosteustekniikka			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 11000, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Klaus Viljanen			
Title: Moisture Transfer Study of Polyvinyl Chloride Roofing with Field Study and Computational Methods			
School: Aalto University School of Engineering			
Department: Department of Civil and Structural Engineering			
Professorship: Structural engineering and building physics		Code: Rak-43	
Supervisor: Jari Puttonen, Professor			
Instructor: Ari-Veikko Kettunen, M.Sc.(Tech)			
<p>The work investigates moisture transfer analysis of low-sloped roof with polyvinyl chloride (PVC) roofing. The main goal of the study was to determine if diffusion is a sufficient drying mechanism or should PVC roofs have ventilation grooves in the insulation layer. An additional goal was to gain more knowledge of the moisture movements in PVC roofs.</p> <p>Relative humidity and temperature was measured in a field study from the thermal insulation of a roof located in Southern Finland. The unventilated roof and the roof with only low pressure air vents could not dry the build-in moisture of 0,35 kg water for square meter of roof during the 8 months study time. Roof with ventilation grooves is more fail-safe and can remove moisture faster. The roof with the ventilation grooves was the driest. The study showed that the extra moisture of the roof is located in the mitre and that large connected roof areas move water from the mitre by the fluttering of the PVC roofing. The vertical and horizontal moisture movements caused by temperature differences in the thermal insulation layer are strong. These movements can be reduced for example with light colored roofing but they cannot be hindered totally. The strong effect of temperature differences to moisture movements should be taken into account in other structures like walls and base floors.</p> <p>The calculations showed that roof leakage and moisture convection cause major moisture loads but moisture loads by diffusion are minor, at most 0,17 kg/m² in a year. Drying by diffusion is approximately 0,25 kg/m² in a year and with ventilation grooves 1 - 16 kg/m² in a year. The results were corresponding to earlier studies. The calculations utilized the results from the field study which increases the validity of the results.</p> <p>The heat and moisture transfer of the roof structure in the field study was modeled with FEM (finite element method) calculation. Hysteresis and temperature dependent moisture isotherm were taken into account. Temperature dependent sorption curve improved the calculation slightly but a simple sorption curve can be used to model drying of the roof. Hygroscopic moisture dries out of the roof by diffusion in 1 - 1,5 years. Cellular plastic as thermal insulation causes minor vertical moisture movements compared to rock wool.</p> <p>The analysis was made mainly to PVC roofs with rock wool but the results can be applied to other roofs case-specifically. The results from the field study include summer and winter time. The areas in the field study were 200 - 400 m² which can affect the level of fluttering of the roofing. More knowledge is needed of the long term moisture corrosion sensitivity of rock wool to evaluate the sufficiency of the drying time.</p>			
Date: 14.2.2012	Language: Finnish	Number of pages: 131 + appendices 16	
Keywords: PVC, polyvinyl chloride, roof, building physics, moisture transfer			

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	II
Abstract	III
Sisällysluettelo	IV
Symboliluettelo	VIII
Määritelmät	XII
Esipuhe.....	XV
1 Johdanto	1
2 Aikaisemmat tutkimukset	4
3 PVC-katon rakenne	6
3.1 PVC-katon rakennekerrokset.....	6
3.2 Kattotyyppi ja katon kaltevuus.....	7
3.3 Uratuuletettu PVC-katto	8
4 PVC-katon lämpötekniinen toiminta.....	10
4.1 Lämmönsiirtymisen perusteita	10
4.2 Lämmöneristeet	13
4.3 Lämmöneristeiden lämmönjohtavuus	14
4.4 Muut lämpötekniset ominaisuudet	16
5 PVC-katon kosteustekniinen toiminta.....	19
5.1 Yleistä.....	19
5.2 Kosteuden aiheuttamat haitat	19
5.3 Rakennuskosteus	20

5.4	Rakennetta ympäröivät kosteusolosuhteet	24
5.5	Kosteudensiirtymismuodot ja kosteuslähteet	25
5.5.1	Kosteuden diffuusio	26
5.5.2	Kosteuden konvektiovirtaus	28
5.5.3	Vesivuodot	36
5.5.4	Kosteuden kondensoituminen	38
5.6	PVC-katon kuivumiskyky	40
5.6.1	Yleistä	40
5.6.2	Diffuusio ulkoilmaan	41
5.6.3	Kuivuminen uratuuletuksella	44
5.6.4	Pumppausvaikutus	44
5.7	Rakennusmateriaalien hygroskooppisuus	45
5.8	PVC-katon materiaalien kosteustekninen toiminta	47
5.8.1	Polyvinyylikloridikate	47
5.8.2	Lämmöneristeet	48
5.8.3	Höyrynsulku	52
6	Kenttätutkimus	54
6.1	Tutkimusohjelma	54
6.1.1	Yleistä	54
6.1.2	Tutkimusjärjestelyt	55
6.2	Tulokset kenttätutkimuksesta	65
6.2.1	Yleistä tuloksista ja sisä- sekä ulkoilman mittaustulokset	65
6.2.2	Lämpötilan mittaustulokset	67

6.2.3	Absoluuttisen kosteuden mittaustulokset.....	70
6.2.4	Suhteellisen kosteuden mittaustulokset	73
6.3	Tulosten tarkastelu.....	76
6.3.1	Kosteuden kuivuminen lämmöneristeestä.....	76
6.3.2	Uratuuletuksen vaikutus rakenteen toimintaan	77
6.3.3	Kosteuden siirtyminen pystysuunnassa	83
6.3.4	Kosteuden siirtyminen vaakasuunnassa.....	86
6.3.5	Kosteuden kondensoituminen ja haihtuminen	88
6.3.6	Kosteus katon jiireissä ja katon lämmöneristävyys	89
6.3.7	Pumppausvaikutus	90
6.3.8	PVC-kattojen kosteusmittaus	91
6.3.9	Yön vastasäteily	93
7	Laskennallinen tarkastelu.....	95
7.1	Yleistä laskennallisesta mallintamisesta.....	95
7.2	Lämpö ja kosteustekninen laskentamalli PVC-katosta	95
7.2.1	Laskentayhtälöt	95
7.2.2	Laskennassa tarvittavat syötteet ohjelmalle	97
7.2.3	Laskentageometriat	104
7.2.4	Laskentaohjelmien vertailu	105
7.2.5	Laskentamallit	106
7.3	Laskentatulokset.....	111
7.4	Tulosten tarkastelu.....	115
8	Johtopäätökset.....	120

9	Yhteenveto	126
	LÄHDELUETTELO.....	128
	LIITTEET	132

Symboliluettelo

A	pinta-ala	m^2
A_r	virtauspinta-ala kohtisuorassa virtaukseen nähden	m^2
A_{ura}	tuuletusuran pinta-ala	m^2
b	raon korkeus rakovirtauksessa	m
c, v	ilman sisältämä absoluuttinen kosteus	$\text{kg}/\text{m}^3, \text{g}/\text{m}^3$
c_p	ominaislämpökapasiteetti	J/kgK
D	hydraulinen halkaisija	m
D	vesihöyryn diffusiviteetti materiaalissa	m^2/s
dG	dw skaalattuna lämmöneristeen paksuudella	kg/m^2
D_p	vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa	m^2/s
D_v	vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa	m^2/s
dw	hygroskooppisen kosteussisällön muutos suhteellisen kosteuden muutoksella $\Delta\phi$	kg/m^3
F_{12}	näkyvyyskerroin kahden pinnan välillä	-
g	putoamiskiihtyvyys	m/s^2
g_{dif}	kosteusvirta diffuusiolla	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$
g_{konv}	kosteusvirta konvektiolla	kg/s
$g_{\text{kuiv.urat}}$	uratuuletuksen siirtämä kosteusvirta	kg/s
$g_{\text{kuiv.urat.m2}}$	uratuuletuksen siirtämä kosteusvirta katoneliöllä	$\text{kg}/\text{katto-m}^2\text{s}$
g_s	kosteusvirta rakenteen pinnan ja ympäröivän ilman välillä	$\text{g}/\text{m}^2\text{s}$
I_h	veden höyrystymislämpö	$2501 \text{ J}/\text{g}$
$I_{\text{sät}}$	säteilylämpövirta laskennan ulkopinnalle	W/m^2
K	lämmönjohtavuuden vesipitoisuudesta riippuva korjauskerroin	Wm^2/kgK
L	höyrynsulun sauman pituus	m
l_{APT}	alipainetuulettimien etäisyys esimerkiksi katon harjan ja räystäään välillä	m

M_w	veden molekyylipaino	18,016 g/mol
n	ainemäärä	mol
p	kaasun paine	Pa
p_0	normaalipaine	101325 Pa
p_u	vesihöyryn osapaine ulkoilmassa	Pa
p_{vh}	vesihöyryn osapaine	Pa
q_{iv}	ilmavirtauksen kuljettama lämpövirta	W
q_{joht}	lämpövirta johtumalla	W
q_{kond}	lämpövirta kondensoitumisen seurauksena	W/m ²
q_{konv}	lämpövirta konvektiolla	W
q_{rako}	ilmavirtaus kapeassa raossa	m ³ /s
q_s	lämpövirta rakenteen pinnan ja ympäröivän ilman välillä	W/m ²
$q_{sät}$	lämpövirta säteilyllä	W
q_v	tilavuusvirta	m ³ /s
$q_{V,D}$	ilmavirtaus Dickin kaavalla	m ³ /s
$q_{V,HS.reikä}$	ilmavirtaus höyrynsulun reikien läpi	m ³ /s
$q_{V,HS.sauma}$	ilmavirtaus höyrynsulun saumojen läpi	m ³ /s
$q_{w,vuoto}$	vuotovesivirta	m ³ /s
R	yleinen kaasuvakio	8,314 J/molK
R	reaktiotermin ajasta riippuvassa laskennassa	kg/m ³ s
R_{ala}	lämpöasetarkastelussa keskimmäisen tasepisteen alapuolinen lämmönvastus	m ² K/W
R_c	kokeellinen reaktiokerroin	0,001
Re	Reynoldsin luku	-
RH, φ	suhteellinen kosteus	%, -
RH_{init}	suhteellinen kosteus laskennan alussa	%, -
R_{si}, R_{se}	lämmönsiirron pintavastus (sisä-, ulkopinta)	Km ² /W

$R_{ylä}$	lämpöasetarkastelussa keskimmäisen tasepisteen yläpuolinen lämmönvastus	m^2K/W
S_d	liikkumattoman ilmakerroksen paksuus, jonka vesi-höyrynvastus vastaa materiaalikerroksen vesi-höyrynvastusta	m
T	lämpötila	$^{\circ}C, K$
T_{init}	lämpötila laskennan alussa	$^{\circ}C, K$
T_s	sisäilman lämpötila	$^{\circ}C, K$
T_u	ulkoilman lämpötila	$^{\circ}C, K$
T_{ura}	lämpötila lämmöneristeen tuuletusuran korkeudella	$^{\circ}C, K$
v	virtausnopeus	m/s
V	tilavuus	m^3
w	materiaalin vesipitoisuus	kg/m^3
w_{ads}	adsorptiokäyrä	kg/m^3
w_{des}	desorptiokäyrä	kg/m^3
v_{init}	materiaalin huokosilman absoluuttinen kosteus laskennan alussa	kg/m^3
w_{init}	materiaalin hygroskooppisesti sitoman kosteuden määrä laskennan alussa	kg/m^3
v_{kr}	ilman kriittinen vesihöyrypitoisuus	g/m^3
w_{max}	materiaalin sisältämä suurin mahdollinen vesimäärä huokosten täyttyessä vedellä	kg/m^3
v_s	absoluuttinen kosteus sisäilmassa	g/m^3
v_t	tuulen nopeus	m/s
v_u	absoluuttinen kosteus ulkoilmassa	$kg/m^3, g/m^3$
v_{ura}	ilman nopeus tuuletusurassa	m/s
Z_p	kosteudenläpäisyvastus	m^2sPa/kg
Z_v	kosteudenläpäisyvastus	s/m
δ_v	kosteudensiirtokerroin	m^2/s
∇	gradientti operaattori	
α	terminen diffusiviteetti	m^2/s

α	lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin	-
α_k	konvektion lämmönsiirtokerroin	W/m ² K
α_s	sisäpinnan lämmönsiirtokerroin	W/m ² K
α_u	ulkopinnan lämmönsiirtokerroin	W/m ² K
β_s	massansiirtokerroin pinnan ja sisäilman välillä	m/s
β_u	massansiirtokerroin pinnan ja ulkoilman välillä	m/s
ε	pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin	-
ε_{12}	resultoiva emissiokerroin	-
η	dynaaminen viskositeetti	Ns/m ²
λ, k	lämmönjohtavuus	W/mK
ρ	tiheys	kg/m ³
ρ_s	sisäilman tiheys	kg/m ³
ρ_u	ulkoilman tiheys	kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmannin vakio	5,67*10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴
ν	kinemaattinen viskositeetti	m ² /s
\dot{m}	massavirta kondensoitumisessa	g/m ² s
Δp	paine-ero	Pa
μ	siirtokerroin Dickin kaavassa	-
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	-
μ_s	rakennusosan sisäpuolen muotokerroin	-
μ_u	rakennusosan ulkopuolen muotokerroin	-

Määritelmät

Absoluuttinen kosteus	Ilman sisältämä vesihöyryn määrä grammoina kuutiometriä kohden.
Hydrostaattinen paine	Tietyn korkuisen neste- tai ilmapatsaan aiheuttama paine patsaan alapuolella.
Hygroskooppinen kosteus	Materiaalin sisältämä kosteusmäärä tietyssä ympäristön suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa.
Hystereesi	Rakennusmateriaalien taipumus sitoa kuivumisvaiheessa enemmän kosteutta kuin kostumisvaiheessa.
Häntä (sorptiokäyrässä)	Kosteusteknisissä laskentamalleissa käytetty materiaalin huokoisuudesta riippuva hygrokoopista kosteutta korkeampi kosteusmäärä.
Kermi	Vedeneristystarkoituksiin käytettävä vettä läpäisemättömän tuote, joka yksinään tai liitettynä toisiin samanlaisiin tai vastaaviin tuotteisiin muodostaa yhtenäisen vedeneristyskerroksen.
Kevätkondenssi	Tilanne jossa katon lämpötila on keväällä lumen alla 0 °C ja ulkolämpötila kohoaa yli katon lämpötilan.
Kompaktikatto	Kattorakenne jossa kaikki rakennekerrokset ovat tiiviisti toisiaan vasten. Katossa ei ole avointa tuuletustilaa, mutta voi olla tuuletusurat
Kosteuskonvektio	Vesihöyryn siirtyminen ilmavirtauksen kuljettamana
Kosteustekninen toimivuus	Rakenteen oikeanlainen toiminta kosteustekniseltä kannalta. Toimivuusvaatimukset ja tekniset ratkaisut riippuvat rakennemuodosta ja ympäristöstä. Edellyttää rakenteen lämpötekniistä toimivuutta.
Loiva katto	Katto, jonka kaltevuus on välillä 1:10 - 1:80
Lämpötasetarkastelu	Energian häviämättömyyteen perustuva aikariippumaton menetelmä tuntemattoman suureen ratkaisemiseksi tiedetyillä lämpövirroilla.

Lämpötekhninen toimivuus	Rakenteen oikeanlainen toiminta lämpötekhniseltä kannalta. Vaipan jatkuva (ei kylmäsiltoja) ja riittävän eristävä lämmöneristys.
Näkyvyyskerroin	Osuus pinnalta A lähtevästä säteilylämmöstä, mikä osuu pintaan B. Esimerkiksi $F_{A \rightarrow B}=0,90$ tarkoittaa, että 90 % pinnalta A lähtevästä säteilystä osuu pinnalle B.
Pumppausvaikutus	Ilman siirtyminen rakenteesta ulos ja rakenteeseen ilman tilavuuden muutoksen vaikutuksesta.
PVC	Polyvinyylikloridi. Kestomuovi. Katemateriaalina käytetään pehmennettyä ja joustavaa polyvinyylikloridia.
PVC-katto	PVC-yksikerroskatteella katettu kattorakenne. Tässä tutkimuksessa tällä tarkoitetaan PVC-kermillä katettuja kompaktikattoja.
PVC-kerrin hulmuaminen	Tuulisella säällä PVC-kermi nousee ilmaan lämmöneristeen pinnasta ja hulmuu aaltomaisesti synnyttäen ilmavirtauksia katteen alle ja tasaten katon kosteus määrää eri alueiden välillä. Edellyttää kerrin kevyttä ja joustavuutta sekä harvaa ja löysää kiinnitystä.
Rakennuskosteus	Rakennusmateriaalien sisältämä, valmistusvaiheessa ja rakentamisaikana materiaaliin siirtynyt kosteus määrä, joka poistuu materiaalista rakenteen kuivuuessa käyttötilanteen tasapainokosteuteen.
Scanning-käyrä	Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä, joka muodostuu siirryttäessä adsorptiokäyrältä desorptiokäyrälle tai päinvastoin.
Terminen diffusiviteetti	Lämmönjohtavuuden osamäärä tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin tulosta. Kuvaa kuinka nopeasti lämpö etenee materiaalissa.
Umpirakenteinen katto	Katon rakennekerrokset on asennettu tiiviisti toisiaan vasten ilman erottavia tuuletusvälejä.
Uratuuletus	Uratuuletus muodostuu lämmöneristeen yläpinnassa olevista urista, joiden kautta ulkoilma virtaa rakenteeseen ja rakenteesta ulos.
Wufi-ohjelma	Saksalainen lämmön- ja kosteudensiirtymisen mallintamiseen käytetty laskentaohjelma.

Yksikerroskate	Yhdestä kermistä tai vedeneristyskerroksesta koostuva kate. Yleensä muovi- tai kumikatteita. Esimerkiksi PVC ja CPE (kloorattu polyeteeni) -katteet.
Kattopinnan ylälämpötila	Katteen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan erotus.
Yön vastasäteily	Lämmönsiirtyminen avaruuteen säteilemällä. Seurauksena vaipan ulkopinnan lämpötila voi olla ulkoilman lämpötilassa tai sitä alempi.
Comsol Multiphysics	Elementtimenetelmään perustuva multifysiikka laskentaohjelma.

Esipuhe

Tämän diplomityön tilaajana oli Kattoliitto ry. Tutkimus oli osa Kattoliiton vuoden 2011 PVC-projektia, jonka tarkoituksena oli kehittää muovisten- ja kumisten katteiden käyttöluokat sekä toimiva PVC-katon tuuletusratkaisu. Tutkimuksen on rahoittanut Teknillisen korkeakoulun tukisäätiö.

Kiitän Kattoliitto ry:tä, erityisesti Heikki Vainiota sekä Mikko Ahtolaa. Kiitän diplomityön valvojaa Jari Puttosta sekä työn ohjaajaa Ari-Veikko Kettusta. Kiitän Sami Niemeä kaikesta avusta työssä. Kiitän Pauli Sekkiä, Martti Viljasta ja Pekka Laamasta kommentista työn tarkastusvaiheessa. Kiitän Heikki Saarista Protan Oy:stä saamastani avusta.

Kiitän perhettäni diplomityön teossa saamastani tuesta ja erityiskiitokset rakkaalle avopuolisolleni Martalle.

Helsingissä 14. helmikuuta 2012

Klaus Viljanen

1 Johdanto

Rakennusten ja kattojen kosteusteknisen toimivuuden tärkeys on tiedostettu jo vuosikymmenien ajan, minä aikana kosteustekniikkaan liittyviä tutkimuksia on tehty Suomessa laajalti. Kosteusteknisen toimivuuden tärkeys ei ole vuosien saatossa vähentynyt, ja tänä päivänä se on yhä keskeinen tekijä rakenteiden kokonaistoimivuuden kannalta. Tästä on esimerkkinä Ympäristöministeriön koordinoima Kosteus- ja hometalkoot -projekti, jonka tavoitteena on muun muassa vähentää kosteus- ja homevauriosta syntyviä terveydellisiä ja taloudellisia menetyksiä [1]. Ilmastomuutoksen ennustetaan kasvattavan sademääriä jopa 40 % kuluvan vuosisadan loppuun mennessä [2]. Samaan aikaan Suomen rakentamismääräyskokoelman lämmöneristysvaatimuksia kiristetään, jolloin rakenteita kuivattavat lämpövirrat alenevat, samalla kun todennäköisyys rakenteiden kosteuspitoisuuksien nousulle kasvaa.

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa määritellään rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden edellytykset niin sanotussa olennaisessa vaatimuksessa, jonka mukaan rakennus on suunniteltava ja toteutettava niin, ettei sen käyttäjille tai naapureille aiheudu hygieniä- tai terveyshaittaa kosteuden kertymisestä rakenteisiin tai sisäpinnoille [3, s.3]. Yläpohjan eri kerrokset ja katon tuuletus on toteutettava siten, että kattoon ei kerry kosteutta haitallisen paljon diffuusiolla tai konvektiolla. Lisäksi mahdollisesti kattoon pääsevän kosteuden on kuivuttava [3, s.14]. Kattojen yleisiä rakenteellisia ohjeita, joilla katosta saadaan toimiva ja pitkäikäinen ovat [4, s.121]:

- Katon tulee suojata sateelta.
- Kattoihin ei saa kerääntyä kosteutta tiivistymällä.
- Rakennuskosteuden on voitava poistua riittävän nopeasti.
- Katossa on oltava tarvittavat ilman- ja höyrynsulut, sekä tarvittaessa tuuletus, jotta kosteutta ei keräänny kattoon.
- Lumen tunkeutuminen rakenteeseen on estetty.

Rakenteelliset ohjeet osoittavat, kuinka katoilta vaaditaan monipuolisia ominaisuuksia. Katot ovatkin yksi rakennuksen tärkeimmistä osista rakennuksen kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Kattojen kosteustekninen toimivuus on osaltaan perusedellytys muun muassa rakennuksen tehokkaalle lämmöneristävyydelle ja terveellisyydelle.

PVC-kattoja (polyvinyylikloridi) on rakennettu 70-luvulta lähtien [5, s.8]. PVC-katot yleistyivät 80-luvulla [6, s.14]. Erään valmistajan PVC-kermillä katettuja kattoja on Suomessa jo yli 2 miljoonaa neliömetriä [7]. PVC-kattoja käytetään yleensä suurissa rakennuksissa, kuten ostoskeskuksissa, jäähalleissa, uimahalleissa, maatalousrakennuksissa ja tehdasrakennuksissa. Katot ovat useimmiten loivia kattoja, eli niiden kaltevuus on välillä 1:10 - 1:80. PVC-kattojen etuna on muun muassa nopea asennus, palonkestävyys, mahdollisuus toteuttaa monimutkaisia geometrioita ja kustannustehokkuus. PVC-kate on yleisin yksikerroskate [6, s.14, 27].

Katon tuuletusratkaisu on yksi merkittävimmistä kattorakenteen kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttavista tekijöistä. Suomessa yli 60 % loivista katoista on tuuletettuja

[8]. Kokemukset ovat osoittaneet, että uratuuletus (eristeen yläosassa on suuruusluokaltaan 20 mm x 20 mm urat noin 200 mm välein) on toimiva ratkaisu rakenteen kuivatuksessa [9]. PVC-kattoja voidaan tehdä myös tuuletettuina, mutta vuoteen 2011 mennessä se on ollut vähäistä. PVC-katot on useimmiten toteutettu umpirakenteena ilman tuuletusta. Tuulettumatonta PVC-kattoa on perusteltu katteen korkealla vesihöyrynläpäisevyydellä, katteen heilunnan aiheuttaman ilmavirtauksen kosteutta tasaavalla vaikutuksella ja joissain tapauksissa kokemuksilla, missä uratuuletuksen on epäilty olleen haitaksi katon toiminnalle. Kosteuden liikkeen tutkiminen PVC-katon lämmöneristeessä on tärkeää, jotta voidaan rajata ongelmarakenteet ja -tilanteet, joissa uratuuleduksesta voi olla haittaa. PVC-kattojen kosteusteknistä toimintaa ei ole selvitetty Suomessa riittävästi, minkä vuoksi ei ole selvää, onko uratuuletus tarpeellinen katon riittävän kuivumiskyvyn varmistamiseksi tai onko uratuuletuksella jopa negatiivisia vaikutuksia katon kosteustekniseen toimintaan.

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, onko diffuusio riittävä kuivumismekanismi PVC-katoissa, vai tarvitaanko kattoihin uratuuletus. Päätavoitteen osatavoitteena oli selvittää, millä reunaehdoilla uratuuletusta ei tarvita. Erillisenä osatavoitteena oli lisätä ymmärrystä PVC-katoissa tapahtuvasta kosteuden liikkeestä. Tavoitteet perustuvat pyrkimykseen parantaa PVC-katon kosteusteknistä toimintaa.

Tutkimuksessa suoritettiin kenttäkoe, jossa mitattiin PVC-katon kuivumista eri tuuletusratkaisuilla. Kenttäkokeen tavoitteena on vastata tutkimuksen päätavoitteeseen PVC-katon tuuletustarpeesta. Kenttäkokeessa tutkittiin myös katon kosteusteknistä toimintaa laajemmin, esimerkiksi kosteuden liikettä lämmöneristeessä eri ilmiöiden vaikutuksesta. Kenttätutkimuksen tuloksia tarkasteltiin kvalitatiivisesti sekä laskennallisesti. Esimerkiksi uratuuletuksen kuivatuskyky laskettiin mitatuilla lämpö- ja kosteustuloksilla.

Päätavoitteen saavuttamiseksi PVC-katon kuivumiskykyä ja kosteusrasituksia arvioitiin kosteudensiirtymiseen käytettävien analyttisten sekä ajasta riippumattomien laskukaavojen avulla. Kosteusrasitusten suuruusluokkien perusteella voidaan arvioida diffuusion riittävyttä katon kuivumismekanismina.

Aikariippuvassa laskennassa tarkasteltiin tuulettamattoman PVC-katon kuivumisaikaa 6 vuoden laskennalla. Laskennassa selvitettiin myös uratuuletuksen tehokkuutta ja kondensoimisherkkyyttä, sekä kosteuden liikettä lämmöneristeessä. Laskentaohjelmalla pyrittiin saamaan vastaavia laskentatuloksia suhteellisesta kosteudesta eristeen eri korkeuksilla, mitä kenttätutkimuksessa oli mitattu päivän aikana. Kosteudenliikkeen tarkastelu ja kuivuminen laajennettiin osassa laskentoja kivivillasta EPS-kattoihin.

Tutkimus oli osa Kattoliiton vuoden 2011 PVC-projektia, jonka tavoitteena oli kehittää muovisten- ja kumisten katteiden käyttöluokat sekä toimiva PVC-katon tuuletusratkaisu. Tutkimuksen tulokset olivat perusteena julkaisujen RIL-107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristämisohteet ja Toimivat Katot päivittämiseen muovi- ja kumikatteiden osalta.

Tutkimus on rajattu rakennusfysikaalisiin ilmiöihin, eikä esimerkiksi katon kuormituskestävyyttä tai kattoon kohdistuvia mekaanisia rasituksia käsitellä. Tutkimuksessa käsi-

tellään pääasiassa ontelolaatan ulkopuolelta kivivillalla eristettyä loivaa kattoa, jotta kenttätutkimuksien tuloksia voidaan verrata muihin tarkasteluihin. Tarkastelut käsittävät sekä uratuuletetun, että tuulettamattoman katon. Tuloksia voidaan soveltaa muille lämmöneristeille harkiten. Tutkimuksessa ei käsitellä erikoisrakenteita, kuten vakuumikat-
toja.

Kenttätutkimus suoritettiin ajanjaksolla 17.6–28.12.2011. Tutkimustulokset edustavat lämmintä ja kylmää vuodenaikaa, mutta tuloksista ei nähdä katon kosteuskäyttäytymistä monen vuoden ajalta.

2 Aikaisemmat tutkimukset

PVC-kattojen kosteusteknistä toimintaa selvitettiin vuonna 2009 valmistuneessa diplomityössä Loivien kermieristettyjen kattojen kosteuskäyttäytyminen eri rakenneratkaisuissa [10]. Työn johtopäätökset viittasivat PVC-kattojen kuivuvan hitaasti PVC-katteen läpi. Mitta-anturit eivät toimineet moitteettomasti, vaan näyttivät jopa 140 %:in suhteellisia kosteuksia. Nämä tulokset johtuivat kattorakenteiden korkeasta rakennuskosteudesta ja viittasivat suhteellisen kosteuden olevan korkea. Talvella ulkoilman kosteussisältö oli samaa luokkaa rakenteen kosteussisällön kanssa, mutta keväällä ja kesällä rakenteen kosteussisältö nousi selvästi ulkoilmaa korkeammaksi, eikä rakenne kuivunut riippumatta siitä, oliko rakenne ura-tuuletettu vai tuulettamaton. Tuloksien perusteella ei voitu arvioida nopeuttaako uratuuletus rakenteen kuivumista.

Norjassa SINTEF Byggforsk on tutkinut kompaktikattojen toimintaa vuonna 2008 julkaistussa tutkimuksessa Kosteus kompaktikatoissa [11]. Tutkimuksessa oli 12 kattoa, joista 3 oli PVC-katteisia. Kattojen kosteutta mitattiin kolmena vuotena ottamalla lämmöneristeestä näytepaloja ja määrittämällä niiden kosteuspitoisuus kuivatuspunnitusmenetelmällä. Kattojen kuivumiskyky vaihteli välillä 0 - 3,5 kg/m²/a, ja joissain näytteissä havaittiin kosteusmäärän lisääntyneen. Hetkittäiset kosteusmittaukset eivät sovellu hyvin katon kuivumiskyvyn tarkasteluun, sillä tutkimuksessa esitettyjen tuloksien tulkinta on vaikeaa.

SINTEF on tehnyt myös toisen PVC-tutkimuksen, missä on esitetty PVC-katon kuivumiskyvystä arvioita. Katon kuivumiskyky diffuusiolla on 0,2 - 0,3 litraa katoneliöltä vuodessa katteen S_d-arvolla (ks. taulukko 15) 20 m. Uritettu rakenne poistaa kosteutta enemmän, luokkaa 2 - 20 litraa katoneliöltä. Tuuletettu, mutta urittamaton rakenne ei tutkimuksen mukaan poista kosteutta kuin 0,1 litraa neliöltä enemmän verrattuna tuulettamattomaan rakenteeseen. [12, s.12]

Vahanen Oy ja Humi-Group Oy tutkivat vuonna 2007 kumibitumikatteellisen loivan katon lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa jatkuvatoimisessa vuoden mittauksessa [9]. Tutkimuksen mukaan alipainetuuletettu uravilla poistaa tehokkaammin kosteutta kuin umpivilla tai tuuletettu urittamaton villa. Uratuuletus kuivasi katon absoluuttisen kosteuspitoisuuden ulkoilman tasolle 1,5 viikon aikana tuuletuksen avaamisesta. Muissa ratkaisuissa kuivumista ei havaittu 2 kuukauden aikana. Tuulettamaton ja tuuletettu urittamaton villa toimivat lähes samalla tavalla kosteudenpoiston tehokkuuden suhteen.

Vahanen Oy tutki vuonna 2003 PVC-katteisen monitoimihallin katon toimintaa [13]. Kattorakenne oli kupolimainen puuristikkorakenne, jonka päällä oli poimulevy, höyryn-sulkumuovi, uritettu lämmöneriste ja PVC-kate. Katon valmistuttua hallin sisällä havaittiin lattialla vuotojälkiä kupolin ja alaosan vaakarakenteen liittymässä. Vuodon syyksi epäiltiin kosteuskonvektiota sisäilmasta ja katevuotoa. Koska PVC-kate todettiin ehjäksi, vuodon syy liittyi lämmön- ja kosteudensiirtymisilmiöihin. Tutkimuksessa todettiin hallin yläosa voimakkaasti ylipaineiseksi. Lisäksi lämpötilamittauksen perusteella katon huipulla oli virtausreitti sisäilmasta lämmöneristeeseen. Kosteuskonvektion määrä oli kuitenkin pieni, sillä sisäilma oli kuivaa. Rakennuskosteuden määrä arvioitiin korkeaksi

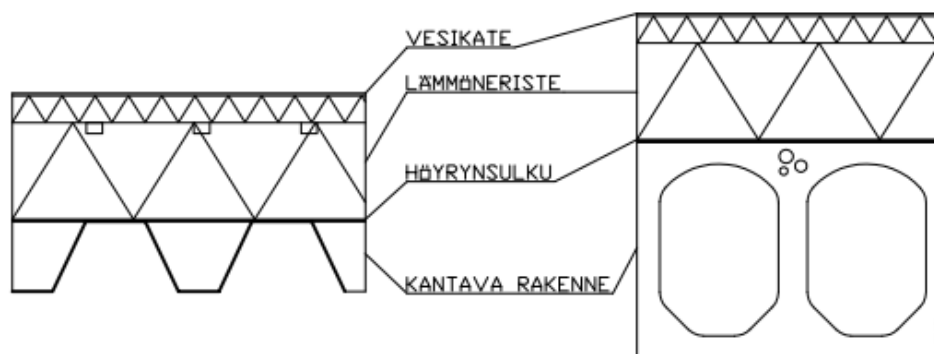
sateen päästyä eristeisiin. Rakennuskosteus siirtyi kivivillassa ja tiivistyessään katteen tai höyrynsulun pinnalle kosteus valui gravitaatiolla kupolikatton ja vaakakaton liittymästä sisätilaan. Myöhemmin esiintyi jatkuvia kosteusvuotoja hallin lattialle, vaikka rakennuskosteus oli poistunut rakenteesta. Nämä vuodot johtuivat ilmeisesti urassa virtaavan ilman kondensoitumisesta kupolin huipulla. Matalalla paistava aurinko lämmitti kupolin alaosan lämmöneristeen ennen yläosan eristettä, johtuen pinnan kaltevuudesta. Tällöin alaosan eriste luovutti tuuletusuran ilmaan kosteutta, joka siirtyi urassa kohti kupolin huippua. Yläosan lämmöneriste oli termisesti jäljessä, jolloin kosteus kondensoitui kylmälle pinnalle. Katon toimivuus saattaisi parantua, jos tuuletus suljetaan ja vähennetään ulkoilman virtausta kattoon.

Aiempien tutkimusten perusteella PVC-kattojen kosteustekninen toimivuus on tapauskohtaista ja tulee aina arvioida huomioiden rakennuksen erityispiirteet, kuten rakennuksen korkeus ja katon kaltevuus. Suurin osa PVC-katoista on loivia, jolloin kattojen kosteusteknistä toimintaa, esimerkiksi kuivumiskykyä, voidaan arvioida yleisellä tasolla.

3 PVC-katon rakenne

3.1 PVC-katon rakennekerrokset

PVC-katon rakennekerrokset ovat kantava rakenne, höyrynsulku, lämmöneriste ja kate (kuva 1). Näiden lisäksi höyrynsulun alla voidaan käyttää aluslevyä tai ohutta lämmöneristekerrosta. Kantavan rakenteen tehtävä on ottaa vastaan katolle kohdistuvat kuormat. Lämmöneriste mahdollistaa miellyttävän sisäilmaston toteuttamisen energia-
tehokkaasti. PVC-kate muun muassa ottaa vastaan ulkopuoliset säärasitukset, ja höyrynsulku estää sisäilman kosteuden pääsyn rakenteeseen ja mahdollistaa rakenteen ilmatiiviuden. Materiaaleista riippuen saatetaan lisäksi tarvita erotuskerroksia, esimerkiksi lämmöneristeen ja katteen välissä.



Kuva 1. Esimerkkejä PVC-katon rakenteista. Vasemmalla poimulevykatto ja oikealla katto, jonka kantava rakenne on ontelolaatasto.

PVC-kattojen kantava rakenne voi olla esimerkiksi betonilaatta, teräspoimulevy tai puuelementti. Betonilaatta voi olla kuori-, TT- tai ontelolaatta. Kantava rakenne vaikuttaa rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen, muun muassa kosteuskuormaan ja siihen, kuinka todennäköistä höyrynsulusta on saada ilmatiivis. Uudisrakennustyömailla betonilaatoissa on aina jäljellä rakennuskosteutta, joka voi siirtyä yläpohjarakenteeseen, jollei höyrynsulkuna ole diffuusiotiivis materiaali. Kosteuden siirtyminen rakenteeseen voidaan estää esimerkiksi bitumikermi höyrynsululla, jolloin betoni kuivuu vain sisäilmaan.

Teräspoimulevyllisissä yläpohjissa tulee olla höyrynsulun alla kova kerros, jonka päällä höyrynsulun saumat voidaan tiivistää luotettavasti [6, s.7]. Höyrynsulun alapuolelle voidaan sijoittaa osa lämmöneristeestä, esimerkiksi kova mineraalivillalevy. Kova kerros voidaan aikaansaada myös tarkoitukseen soveltuvalla rakennuslevyllä. Poimulevyssä on yleensä vuotokohtia sauma- ja kiinnityskohdissa, jotka mahdollistavat konvektiovirtaukset yläpohjarakenteen ja sen ympäristön välillä. Poimulevykaton kosteusteknistä toimintaa on tutkittu lähteessä [14].

Kantava rakenne vaikuttaa katon kosteustekniseen toimintaan merkittävästi vain erikoistapauksissa, kuten esimerkiksi pakkasvarastoissa, missä turvallisimmin kantava rakenne lie-
nee betonilaatta, jonka höyrynsulkuna on bitumikermi. Betonilaatan päällä höyrynsulun

saumat on työtekniisesti mahdollista tiivistää tasaisella kovalla alustalla. Kantavalla rakenteella vaikuttaa myös siihen, kuinka nopeasti sisäilman lämpötilan muutos tai alapuolisen tilan lämpökuormat vaikuttavat lämmöneristeen lämpötilaan.

Puisissa kantavissa rakenteissa tai puuelementtiyläpohjissa tulee kiinnittää erityistä huomiota yläpohjan kosteuden kestävyys ja kuivumiskykyyn.

3.2 Kattotyyppi ja katon kaltevuus

Vesikatot jaetaan loiviin ja kalteviin kattoihin. Loivien kattojen minimikaltevuus on 1:80 ja kaltevien kattojen 1:10. Loivilla katoilla käytetään jatkuvia katteita, muun muassa PVC-katetta, ja kaltevilla katoilla epäjatkuvia katteita. [15, s.45] Jatkuva kate tarkoittaa katetta, joka on vesitiivis vedenpaineen alaisena. PVC-katteita käytetään loivien kattojen lisäksi myös kaltevissa katoissa ja muodoltaan vaativissa rakennuksissa kuten kupolikatoissa. Katto voi olla myös osittain loiva ja osittain jyrkkä. Kuvassa 3 on esitetty PVC-katteinen harjakatto, tasakatto ja kupolikatto.



Kuva 2. PVC-katon kaltevuus ja geometria vaihtelee rakennustyyppistä riippuen [7, s.1]. Kaltevuus ja geometria vaikuttavat katon lämmöneristeessä tapahtuviin kosteuden liikkeisiin.

Kattotyyppi vaikuttaa katossa tapahtuviin lämpö- ja kosteusilmiöihin, joten muun muassa rakenteen tuuletusratkaisu ja höyrynsulku on aina suunniteltava kattotyyppi huomioiden. Katon kaltevuus vaikuttaa kosteuden siirtymiseen katteen päällä, katteen alapinnassa ja höyrynsulun päällä gravitaatiolla. Gravitaation vaikutus on pienin loivassa katossa.

Kaltevuus vaikuttaa siihen, kuinka pitkään katolla on lunta keväällä. Jyrkempi katto poistaa lumen aiemmin kuin loiva katto. Loivilla katoilla lumi poistuu lähinnä sulamalla ja valumalla kattokaivoihin. Kuvan 2 kupolikatoissa lumi saattaa poistua kupolin reunoilta aiemmin kuin huipulta. Katon pinnalta eri aikaan poistuva lumi aiheuttaa katon eri alueiden välille lämpötilaeroja.

Katon kaltevuus vaikuttaa myös auringonsäteilyn voimakkuuteen. Esimerkiksi harjakatossa katon etelälappeelle kohdistuu merkittävästi enemmän auringon säteilyä kuin pohjoislappeelle. Kaltevuus vaikuttaa lisäksi päivä- ja vuositasolla ajankohtaan, jolloin säteily osuu kattopinnalle. Esimerkiksi loivilla katoilla auringon lämmittävä vaikutus on suurin kesällä keskipäivällä, mutta talvella säteilyä osuu katolle vähän auringon paistessa matalalta. Katolle muodostuu varjoalueita sitä todennäköisemmin, mitä kaltevampi katto on.

Rakennuksen ja katon geometria vaikuttaa tuulen aiheuttamaan painevaikutukseen katonlehdelle. Tuulen painevaikutukseen vaikuttaa myös rakennuksen suunta vallitsevaan tuulensuuntaan nähden. Painevaikutus voi suurentaa kattoon sisäilmasta kohdistuvia ilmavirtauksia.

3.3 Uratuuletettu PVC-katto

Uratuuletetussa katossa on lämmöneristeen yläosassa tuuletusurat, joiden koko on 20 - 30 x 30 - 50 mm² (korkeus x leveys). Ilma virtaa uriin räystäältä ja poistuu katon harjalla ja jirissä olevista alipainetuulettimista, mitkä on yhdistetty toisiinsa kokoojakanavalla. Kokoojakanava ja tuuletusurat on esitetty kuvassa 3. Kokoojakanavien määrä riippuu katon dimensioista siten, että mitä leveämpi rakennus, sitä useampia kokoojakanavia tarvitaan katon riittävään tuuletukseen. Harjalla olevien alipainetuulettimien välinen etäisyys tulisi olla enintään 10 m [15, s.54]. Jos rakenteellisista tai muista syistä kokoojakanavien etäisyys on suuri, on suositeltavaa kasvattaa kokoojakanavassa olevien alipainetuulettimien määrää.



Kuva 3. Lämmöneristeen yläpinnassa olevat tuuletusurat ja eristeeseen tehty kokoojakanava.

Uratuuletus perustuu tuuleen, savupiippuvaikutukseen ja pumppausvaikutukseen. Tuuli aiheuttaa räystäälle ja alipainetuulettimille ali- tai ylipainetta ja saa ilman virtaamaan rakenteessa. Savupiippuvaikutuksessa uran ulkoilmaa kevyempi lämmin ilma virtaa alipainetuulettimesta ulos. Nykyisten kasvaneiden lämmöneristyspaksuuksien vuoksi uran ilman lämpeneminen sisäilman vaikutuksesta on vähäistä, mutta auringonpaisteessa ilma lämpenee urassa jopa 70 asteiseksi.

Uratuuletus lisää katon kuivumiskykyä merkittävästi. Uratuuletuksen vaikutus PVC-katon kuivumisessa voi tulevaisuudessa olla ratkaiseva, jos diffuusiolla tapahtuva kuivuminen alentuu ulkoilman kosteuden noustessa.

Uratuuletus ei viilennä rakennetta merkittävästi, mikä aiheuttaisi talvella ylimääräistä lämpövirtaa verrattuna umpirakenteeseen. Uratuuletus lisää eräiden arvioiden mukaan energiankulutusta 0 - 5 % [16, s.32]. Kun urituksen päällä on 20 mm eriste, lämpöhukan arvioidaan olevan alle 1 % [12, s.4]. Urituksen vaikutus on käytännön mittauksissa todettu vähäiseksi [17, s.7]. Urituksen vaikutus voidaan huomioida vähentämällä katon lämmönvastuksesta 0,1 - 0,2 m²K/W [15, s.54]. U-arvoon verrattuna tämä vastaa 0,9 - 1,8 %:a katon lämmönvastuksesta.

Uratuuletuksen yhteydessä ohjeistetaan käyttämään ilmatiivistä höyrynsulkua [15, s.54], joka tulisi asentaa tasaiselle alustalle [6, s.24]. Tämä on uratuuletuksen onnistuneen asennuksen ja toimivuuden ehdoton edellytys. Höyrynsulun ilmatiiviys on sitä tärkeämpää, mitä tuulettuvampi rakenne on.

Uratuuletuksista ei tule käyttää kylmä- ja pakkasrakennuksissa, sillä tuuletusilma on esimerkiksi kesäisin lämpimämpää kuin lämmöneriste ja voi kondensoida lämmöneristeen kosteutta. Teoriassa lämmöneristeen voi tuulettaa sisäilmalla, sillä kylmä sisäilma on kuivaa. Lämmöneristeen tuuletus sisäilmaan ei ole niin tehokasta kuin perinteinen uratuuletus, sillä se ei pysty hyödyntämään auringonsäteilyn vaikutusta. Tuuletuksista sisäilmalla ei ole tiettävästi toteutettu käytännössä kylmissä rakennuksissa.

4 PVC-katon lämpötekkinen toiminta

4.1 Lämmönsiirtymisen perusteita

Lämmönsiirtyminen tapahtuu rakenteissa johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Johtumisessa lämpöä siirtyy energiaa sisältävistä partikkeleista vähemmän energiaa sisältäviin partikkeleihin. Johtuminen voi tapahtua kiinteässä aineessa, nesteessä tai kaasussa. [18, s.17] Tasapainotilassa lämpövirta johtumalla [W] voidaan kuvata Fourierin kaavalla 1.

$$q_{joht} = \lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

missä λ on materiaalin lämmönjohtavuus [W/mK], A on pinnan ala [m²], T on lämpötila [K] ja x on tarkastelumatka [m]. Lämmönsiirtyminen pisteiden A ja B välillä on siis riippuvainen materiaalin lämmönjohtavuudesta ja lämpötilan muutoksesta pisteiden A ja B välillä pituusyksikköä kohden. Lämmönjohtuminen rakenteissa tapahtuu 3-ulotteisesti.

Konvektiossa eli kuljettumisessa lämpö siirtyy neste tai kaasuvirtauksen aikaansaamana pinnan ja virtauksen välillä. Konvektiolla siirtyvä lämpövirta voidaan laskea Newtonin jäähtymislaitilla kaavalla 2.

$$q_{konv} = \alpha_k A (T_p - T_\infty) \quad (2)$$

missä α_k on konvektion lämmönsiirtokerroin [W/m²K], A pinnan ala [m²], T_p on pinnan lämpötila [K] ja T_∞ on virtaavan nesteen tai kaasun lämpötila [K]. Lämmönsiirtokerroin voidaan määrittää esimerkiksi kokeellisilla kaavoilla, joissa kerroin riippuu virtaavan aineen nopeudesta tai pinnan ja virtaavan aineen välisestä lämpötilaerosta. Lämmönsiirtyminen konvektiolla on kompaktikattojen sisällä vähäistä ja voi tapahtua lämmöneristeen tuuletusurissa ja katteen alla katteen hulmutessa tuulella. Lisäksi vähäistä ilmavirtausta tapahtuu aina lämmöneristelevyjen välissä asennuksen epätäydellisyydestä ja materiaalien välisestä rajapinnasta johtuen.

Tarkasteltaessa tietyn tilavuuden energiatasetta lämmönsiirtyminen ilmavirtauksista [W] voidaan laskea kaavalla 3.

$$q_{iv} = \rho c_p q_v (T_{sp} - T_{up}) \quad (3)$$

missä ρ on ilman tiheys [kg/m^3], c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK], q_v on tilavuusvirta [m^3/s], T_{sp} on sisäänpuhallusilmavirta [m^3/s] ja T_{up} on ulospuhallusilmavirta [m^3/s].

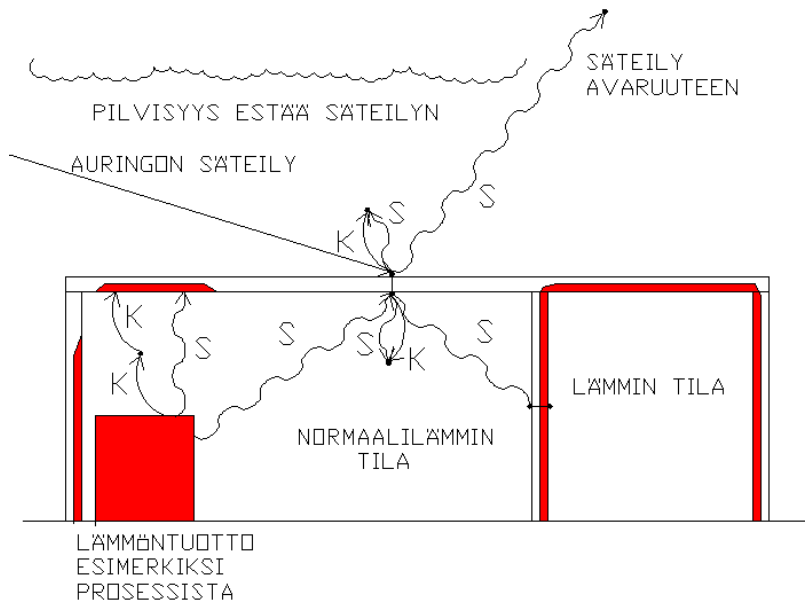
Säteilylämmönsiirto kahden pinnan välillä voidaan laskea kaavalla 4.

$$q_{sät} = \varepsilon_{12} \sigma F_{12} A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

missä ε_{12} on resaltoiva emissiokerroin [-], σ on Stefan-Bolzmännin vakio [$5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$], F_{12} on näkyvyyskerroin pintojen välillä [-], A on pinta-ala [m^2], T_1 on pinnan 1 lämpötila ja T_2 on pinnan 2 lämpötila [K]. Säteilylämmönsiirto on sitä suurempi, mitä suurempi on näkyvyyskerroin ja pintojen lämpötilaero. Katoilla säteily tapahtuu ulkoilmaan, -pinnoille ja avaruuteen sekä sisäilmaan ja -pinnoille. Loivien kattojen ja taivaan välinen näkyvyyskerroin voi olla jopa 1, joka osaltaan lisää kattopinnan säteilylämmönsiirtoa ulkoilmaan ja avaruuteen.

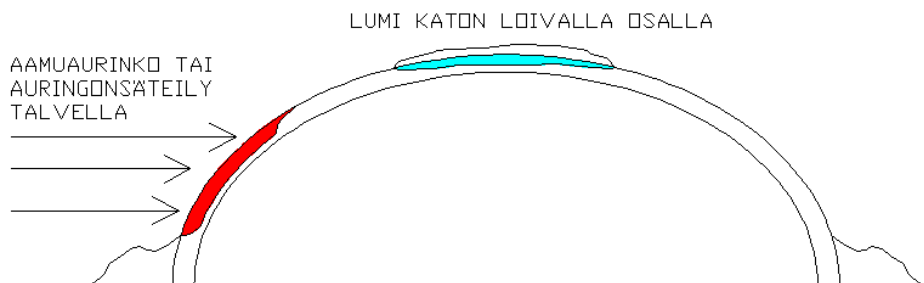
Yöaikaan ja erityisesti kirkkaina talviöinä kattopinnan lämmönsiirron pintavastus voi olla negatiivinen, esimerkiksi $-0,1 \text{ Km}^2/\text{W}$ [4, s.47]. Tämä johtuu siitä, että katto säteilee lämpöä avaruuteen, mitä kutsutaan yön vastasäteilyksi. Kattopinnan lämpötila voi tällöin olla alempi kuin ulkoilman, jolloin ilman kosteus saattaa kondensoitua katon päälle tai uratuuleuksessa katteen alle. Kirjallisuudessa on esitetty taivaan vastasäteilylämpötilan arvoja katolla ulkolämpötilan funktiona. Taivaan lämpötila on katoilla $10 - 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ulkolämpötilaa alempi [19, s.319]. Yön vastasäteilyn suuruuteen liittyy aina satunnaisuutta pilvisyyden ja ilman koostumuksen vaikutuksesta. Kattopinnan lämpötila laskee yöllä sitä alemmaksi, mitä alempi lämmönsiirtyminen on ulkoilmaan, eli mitä alempi konvektion lämmönsiirtokerroin on kaavassa 2.

Kuvassa 4 on esitetty kompaktikatoissa esiintyvät lämmönsiirtoilmiöt. Kuvassa tarkastellaan katon kohtaa, jonka alapuolisessa tilassa on paikallista voimakasta lämmöntuottoa ja alapuolisen tilan viereisen tilan lämpötila on poikkeuksellisen korkea. Viereisten kattojen lämpötila vaikuttaa koko katon sisäisiin kosteuden liikkeisiin. On myös huomioitava, että jos tarkastelupiste sijaitsi kuvan 4 rakennuksen reunalla, kohdan lämpötila olisi korkea.



Kuva 4. Kattoon vaikuttavia lämpövirtoja konvektiolla (kuvassa K) ja säteilyllä (kuvassa S). Lämmönjohtuminen tapahtuu rakenteiden läpi.

Kuvassa 5 on esitetty katon kaltevuuden vaikutus katon lämpötiloihin. Auringonsäteily osuu kaltevalle katolle suuremmassa kulmassa kuin loivalle katolle. Katon loivalla osalla on lunta, joka pitää katon lämpötilan alhaisena, vaikka kuvan 5 mukaisessa tilanteessa aurinko säteilisi korkeammalta.



Kuva 5. Auringonsäteily kesällä aamuisin ja talvella on voimakasta jyrkälle katon osalle. Lisäksi lumi vaikuttaa katon lämpötiloihin.

PVC-katon lämpöteknisen toiminnan arvioinnissa on aina huomioitava eri lämmönsiirtoilmiöt, katon kaltevuus ja alapuolisten tilojen vaikutus katon ja viereisten kattoalueiden lämpötiloihin. Katon pintalämpötilaan vaikuttaa lisäksi sade. Sateisena päivänä katon pintalämpötila jää alemmaksi kuin ajankohdan selkeänä päivänä. Lisäksi katon varjoisilla alueilla lämpötilat jäävät auringonpaisteella alemmiksi kuin avoimet kattopinnat.

4.2 Lämmöneristeet

PVC-katoissa käytetään lämmöneristeinä kivivillaa tai solumuoveja (polystyreeni ja polyuretaani). Kuvassa 6 on esitetty kivivillan asentamisvaihe PVC-katossa.



Kuva 6. Kivivillan asennus PVC-katon rakennusvaiheessa.

Kivivilla on epäorgaaninen lämmöneriste, joka koostuu kuiduista ja sideaineista. Sideaineena käytetään yleensä hartsia. Lisäksi käytetään muun muassa öljyä parantamaan kosteusteknisiä ominaisuuksia. Kivivillan lämmöneristävyys perustuu siihen, että sen ilmatilan osuus eristeen kokonaistilavuudesta on 95 - 99 % [4, s.152]. Kivivillan ilmanläpäisevyys on lasivillaa alempi, mutta merkittävästi solumuoveja suurempi katon pinnan suunnassa. Kivivillan etuina solumuoveihin verrattuna ovat sen palonkestävyys ja akustiset ominaisuudet, mitkä on esitetty taulukossa 1. Kivivilla on altis vaurioitumaan iskuista, mikä lisää katteen vaurioalttiutta. Kivivilla ei ime kosteutta itseensä.

Taulukko 1. Lämmöneristeiden ilmanläpäisevyys, palonkestävyys ja akustiset ominaisuudet.

	Tiheys [kg/m ³]	Ilmanläpäisevyys κ [m ³ /msPa] *10 ⁻⁶	Lähde	Palonkestävyys	Akustiikka	Lähde
Mineraalivilla	10–50	80–400 (kuituja vasten) 160–800 (kuitujen suuntaisesti)	[19, s.490] [19, s.490]	Palamaton tai lähes palamat- ton	Absorboi ääntä erityi- sesti suurilla taajuuksilla	[21]
Mineraalivilla	100–150	15–50 (kuituja vasten) 30–400 (kuitujen suuntaisesti)	[19, s.490] [19, s.490]			
EPS	15–20	30–500 1–1,6	[19, s.490] [17, s.3]	Palava materi- aali	-	[22]
XPS	25–55	9,5	[20]	Palava materi- aali	-	[23]

Polystyreenit ovat muottimenetelmällä (EPS, expanded polystyrene) tai suulakepuristusmenetelmällä (XPS, extruded polystyrene) valmistettuja kestopuoveja. EPS koostuu mikrokennostosta, jossa on liikkumatonta ilmaa. XPS:n kennoissa on valmistamisessa käytettyä kaasuseosta, jonka lämmönjohtavuus on ilmaa alempi. XPS-eristettä käytetään lähinnä käännetyissä katoissa.

Polystyreenejä käytettäessä on huomioitava, että PVC-katteen ja lämmöneristeen väliin on asennettava erotuskerros. Erotuskerros estää katteen ja polystyreenin välisen kemiallisen reaktion, joka ajan mittaan poistaisi pehmenintä PVC-muovista ja alentaisi katteen käyttöikää. Myös bitumikatteen vaativat erotuskerroksen esimerkiksi korjauskoh-teissa. Erotuskerros voi olla lasikuituhuopa, suodatinkangas, polyesterikangas tai mine-raalivillakerros. Erotuskerros voi olla asennettu suoraan PVC-katteen kääntöpuolelle. [5, s.23]

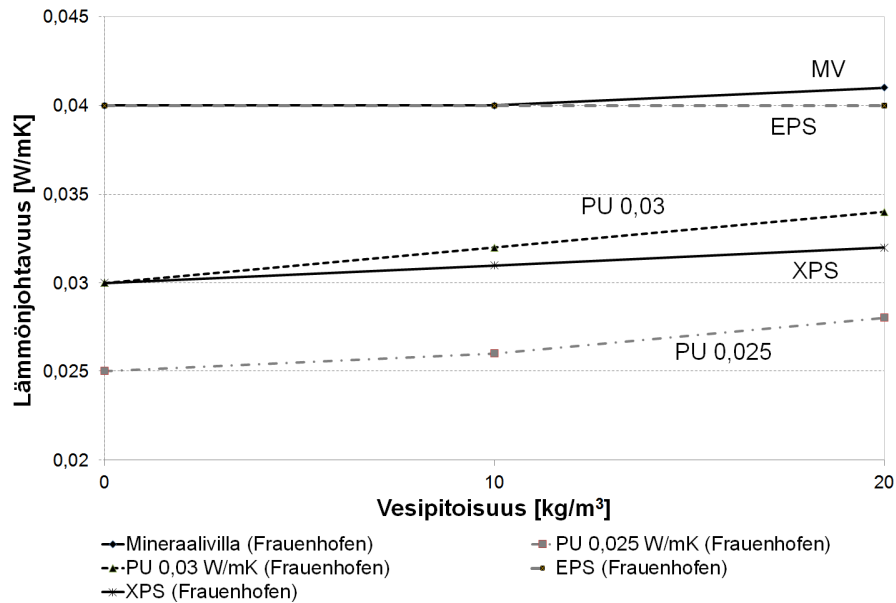
PUR-eristeet valmistetaan vaahdottamalla, mistä johtuu niiden toinen nimi vaahto-muovit. Polyuretaanin homogeeninen suljettu rakenne koostuu lähekkäin olevista kaa-susoluista. [4, s.170 - 172]. Polyuretaanisolumuovi on siksi tiivistä. Solut sisältävät kaa-sua, jonka lämmönjohtavuus on alle ilman lämmönjohtavuuden. Tiheys on yleensä 33 - 45 kg/m³. Kattojen polyuretaanilevyt voi olla pinnoitettu alumiinilaminaatilla [15, s.83].

PVC-kattojen lämmöneristeen tulee olla kosteutta kestävä, sillä kattorakenteen raken-nuskosteus saattaa suljetussa rakenteessa olla pitkän aikaa korkealla. Tästä syystä lasi-villaa ei käytetä PVC-katoissa. Myöskään puupohjaisia lämmöneristeitä ei voi käyttää PVC-katoissa.

Lämmöneristeet asennetaan limittäin siten, että päällekkäisten kerrosten saumat eivät kohtaa, ja ettei saman kerroksen eristeistä muodostu ristikuviota. Tällä estetään ilmavir-tauksia lämmöneristekerroksessa ja parannetaan näin lämmöneristävyttä. Usein läm-möneriste koostuu kahdesta kerroksesta, joista ylempi on tiheydeltään korkeampi ja pystyy ottamaan vastaan kattoon kohdistuvat kuormitukset. Uratuuletusta käytettäessä urat sijaitsevat eristelevyjen välissä alemman levyn yläpinnassa tai ylemmän levyn ala-pinnassa.

4.3 Lämmöneristeiden lämmönjohtavuus

Tärkeimmät katon lämmöneristävyteen vaikuttavat tekijät ovat lämmöneristeen pak-suus ja lämmönjohtavuus. PVC-katoissa käytettyjen eristeiden lämmönjohtavuuksista on esimerkkejä kuvassa 7 ja taulukossa 2. Lämmönjohtavuudet ovat luokkaa 0,025 - 0,041 W/mK. Materiaalien lämmönjohtavuus ei ikinä ole tarkkaan ottaen vakio, vaan riippuu esimerkiksi materiaalin kosteuspitoisuudesta. Kosteuden vaikutus on erityisesti huomioitava lämmönjohtavuudessa, jos materiaalin kosteus määrä on kapillaarisella alu-eella [24]. Kuvassa 7 on esitetty PVC-katoissa käytettyjen eristeiden lämmönjohtavuuk-sien riippuvuus materiaalin vesipitoisuudesta Wufi-ohjelman materiaalikirjaston mu-kaan [25]. Käytännössä PVC-katon jiirissä, räystäällä tai nurkka-alueilla voi olla kuvan 7 mukaisia määriä kosteutta. Lähteen [25] mukaan mineraalivillan lämmönjohtavuus ei riipu alhaisilla kapillaarikosteuden määrillä yhtä merkittävästi sen kosteuspitoisuudesta kuin RIL-155:n mukaan. RIL 155 mukaan kivivillan lämmönjohtavuus nousee merkit-tävästi eristeen kosteuspitoisuuden ylittäessä 1 paino-% [4, s.158-159].



Kuva 7. Lämmönjohtavuuden λ kosteusriippuvuus kapillaarisella alueella Wufi-ohjelman materiaalikirjaston mukaan. Kuvaajat jatkuvat aina vesipitoisuuteen 950 kg/m^3 asti, jolloin lämmönjohtavuus on veden lämmönjohtavuus $0,6 \text{ W/mK}$.

Hygroσκοoppisen kosteuden vaikutuksesta lämmönjohtavuuteen on esitetty korjauskaava [19, s.297]:

$$\Delta\lambda = K * w \quad (5)$$

missä K on korjauskerroin [Wm^2/kgK] ja w on vesipitoisuus [kg/m^3] hygroσκοoppisella alueella. EPS:n kertoimeksi K on esitetty $0,00013 \text{ Wm}^2/\text{kgK}$ ja XPS:n $0,0001 \text{ Wm}^2/\text{kgK}$. Lämmönjohtavuus ei siis riipu merkittävästi lämmöneristeen kosteudesta hygroσκοoppisella alueella.

Kivivillan lämmönjohtavuus kasvaa noin $0,0035 - 0,0045 \text{ W/mK}$, kun eristeen lämpötila nousee $-10 \text{ }^\circ\text{C}$:sta $+20 \text{ }^\circ\text{C}$:een [24, s.31 - 36].

Suulakepuristetun polystyreenin, esimerkiksi Roofmaten, lämmönjohtavuus riippuu eristeen lämpötilasta. Lämpötilamuutos $10 \text{ }^\circ\text{C}$:sta $40 \text{ }^\circ\text{C}$:een lisää lämmönjohtavuutta noin $0,00225 \text{ W/mK}$ [4, s.168 taulukko 30]. XPS:n lämmönjohtavuus kasvaa noin $0,003 \text{ W/mK}$, kun paisutuskasvu poistuu kennoista [4, s.168, kuva 31].

Muottimenetelmällä valmistettujen polystyreenieristeiden (EPS) lämmöneristävyys ei muutu kosteuden (kuva 7) tai lämpötilan mukaan.

Polyuretaanin lämmönjohtavuus kasvaa hieman ilman diffusoituessa soluihin. Tätä voidaan hidastaa pinnoitteilla. [4, s.171]

Lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuus kasvaa merkittävästi, jos materiaalin kosteuspitoisuus on kapillaarisella alueella [19, s.296]. Yleensä tällainen tilanteen ei pitäisi esiintyä rakenteissa. Lämmönjohtavuuden lämpötila- ja kosteusrippuvuus ei vaikuta oleellisesti rakenteiden lämmöneristävyys ja energiatehokkuuteen, jollei eriste ole hyvin märkä.

Lämmönjohtavuuksien pieni riippuvuus lämpötilasta ei vaikuta ratkaisevasti katon lämpötekniseen toimintaan, vaikka katto lämpiää merkittävästi auringonpaisteella, sillä katon lämpötekninen toiminta riippuu myös eristeen tiheydestä ja ominaislämpökapasiteetista (kaava 6).

Nykyisten lämmöneristysvaatimuksien mukaan lämpimän tilan yläpuolisen katon lämmönläpäisykerroin, eli U-arvo, tulee olla $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ [26]. Taulukkoon 2 on koottu eri materiaalien vaaditut paksuudet.

Taulukko 2. Loivan katon vaadittu lämmöneristyspaksuus eri materiaaleilla, kun rakenteen U-arvo on $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$.

eriste	lämmönjohtavuuden λ suunnitteluarvo [W/mK]	vaadittava eristyspaksuus [m]
Kivivilla (Rockwool Hardrock)	0,038	0,408
EPS (Thermisol EPS 60 S katto)	0,041	0,44
XPS (finnfoam)	0,037	0,397
Polyuretaani (SPU)	0,025	0,268

Nykyisten rakentamismääräysten mukaisissa yläpohjissa on taulukon 2 mukaan noin 270 - 450 mm lämmöneristettä.

4.4 Muut lämpötekniset ominaisuudet

Lämmönjohtavuuden lisäksi materiaalin lämpöteknisiin ominaisuuksiin luetaan sen tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja säteilyominaisuudet. Lämmönjohtavuuden, tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin avulla voidaan määrittää terminen diffusiviteetti, mikä kuvaa aineen kykyä siirtää lämpöä eteenpäin. Suurella termisellä diffusiviteetillä lämpöenergia siirtyy nopeasti eteenpäin eikä varastoidu materiaaliin. Terminen diffusiviteetti α [m^2/s] lasketaan kaavalla:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (6)$$

missä λ on materiaalin lämmönjohtavuus [W/mK], ρ on tiheys [kg/m^3] ja c_p on ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]. Seuraavassa on esitetty eräiden PVC-kattomateriaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia.

Taulukko 3. PVC-katon materiaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia.

eriste	lämmönjohtavuus λ	tiheys ρ	ominaislämpökapasiteetti c_p	terminen diffusiviteetti α
	[W/mK]	[kg/m ³]	[J/kgK]	[m ² /s]
Kivivilla (Rockwool Hardrock)	0,038	90	850	4,97E-07
EPS (EPS katto)	0,041	15	1210	22,6E-07
PUR (SPU)	0,025	35	1400	5,10E-07
betoni	1,7	2300	900	8,21E-07
PVC-kermi (protan SE1.2)	0,15	1250	1500	0,8E-07
teräspoimulevy	50	7800	500	128E-07
singelikerros	2	2000	1000	10E-07

Poimulevykatoissa rakenteen sisäpinta ei vaikuta eristekerroksen lämpötiloihin. Betoni-laatta puolestaan omaa kykyä estää lämmön etenemistä lämmöneristeen tapaan. Tämä on kuitenkin usein merkityksetöntä, sillä sisäilman lämpötilamuutokset ovat hyvin hitaita. Kantavan rakenteen terminen diffusiviteetti vaikuttaa katon lämpötilaan merkittävästi, jos katon alapuolella on lämpöä tuottava prosessi ja vaikutus on sitä suurempi, mitä enemmän prosessin lämmöntuotto vaihtelee ajallisesti (kuva 4).

PVC-katoilla käytetyistä eristeistä suurin terminen diffusiviteetti on EPS:llä. Tämä aiheuttaa EPS:llä eristetyissä katoissa suurempia lämpötilamuutoksia voimakkaalla auringonpaisteella, kuin mitä esiintyy muilla eristeillä. Termisen diffusiviteetin merkityksen arvioinnissa on huomioitava rakenteen paksuuden vaikutus. Ohut kerros lämmöneristettyä ei vastusta lämmönsiirtymistä. Katoilla, joissa on katteen päällä esimerkiksi soraa, auringon lämmittävä vaikutus jää selvästi pienemmäksi.

Talvella PVC-katon lämpötilamuutokset ovat vähäisiä, kun kylmä ulkoilma aiheuttaa lämmöneristeen yli voimakkaan lämpötilagradientin. Kesäisin lämpötilajakauma vaihtelee voimakkaasti päivän kuluessa. Suurin syy tähän on voimakas auringonpaiste, joka myös nostaa kesäpäivän lämpötilavaihtelun amplitudia. Taulukossa 4 on esitetty kattopintojen säteilyominaisuuksia, jotka vaikuttavat katon lämpötiloihin erityisesti kesällä.

Taulukko 4. Kattopintojen ylälämpötiloja, absorptiokertoimia ja emissiokertoimia. Ylälämpötila laskettu ulkoilman lämpötilalla 25 °C.

Katemateriaali	Ylälämpötila T [°C]	Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin α [-]	Pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin ϵ [-]	Lähde
bitumikate tai musta väri	55	0,94	0,98	[18, s.28],[27, s.53]
PVC-kermi, vaaleanharmaa	35	0,65	0,9	[28]
PVC-kermi, tummanharmaa	45	0,85	0,9	[28]
käsittelemätön alumiinipelti	36	-	-	[27, s.53]
valkoinen pinta	24	0,18	0,9	[18, s.28], [27, s.53]
lasi	-	-	0,84	[18, s.177]
teräs	-	-	0,25	[18, s.177]
kirkas alumiini	19	0,22	0,07	[27, s.53],[18, s.28]

Taulukon 3 perusteella katon ylälämpötila riippuu katon lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimesta. PVC-katon ylälämpötila, eli katteen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan erotus, on korkeimmillaan noin 45 °C. Auringonpaisteessa PVC-katon lämpötila voi nousta lähelle 70 °C:ta. 50 mm syvyydellä lämmöneristeessä lämpötila nousee noin 45 °C:een, mutta lämmöneristeiden alapuolella lämpötila ei muutu merkittävästi auringonpaisteen vaikutuksesta. PVC-kermejä on saatavana myös vaaleampana, jolloin ylälämpötila on noin 35 °C. PVC-kermien ylälämpötila on korkea, mikä nostaa katon uratuuletuksen tehokkuutta. Bitumikatoille tehtyjä tutkimuksia uratuuletuksen kosteudenpoistokyvystä voi verrata PVC-kattoon, sillä PVC-katteen lämpötilat ovat lähes yhtä korkeat.

Absorptiokertoimen laskeminen alentaa rakennuksen energiankulutusta, mutta vaikutus on vähäinen. Suurin hyöty alhaisella absorptiokertoimella saadaan toimistorakennuksesta, jossa on ilmastointi ja suuri sisätilan lämmöntuotto. [29] Emissio-ominaisuuksiltaan kompaktikattojen katteet ovat vastaavia, joten materiaalivalinnalla ei voida juurikaan vaikuttaa säteilylämmönsiirtymiseen ja esimerkiksi yön vastasäteilyn suuruuteen.

5 PVC-katon kosteustekninen toiminta

5.1 Yleistä

Katon kosteuskäyttäytyminen on monimutkaista, mistä johtuen esimerkiksi katon kosteusmittauksessa ja kosteudensiirron mallintamisessa tulee huomioida lukuisia mittaus- ja laskentatuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Laskennoissa materiaaliominaisuuksien huolellinen valinta on keskeinen työvaihe. Kosteusmittauksessa mittaukset tulee kohdistaa oikeisiin paikkoihin ja tuntea kosteudensiirtymiseen vaikuttavat ilmiöt. Katon laajemmassa toimivuusanalyysissä vaikuttavien tekijöiden määrä kasvaa entisestään. Kuvassa 6 on esitetty PVC-katon kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttavat seikat.

Kosteuslähteet	Kuivumiskyky	Kosteuden aiheuttamat haitat
<ul style="list-style-type: none">•Rakennuskosteus•Käytön aikaiset kosteuslähteet sisällä ja ulkona: diffuusio, konvektio, vesivuodot	<ul style="list-style-type: none">•Tuuletusratkaisu•Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys•Ulkoilman olosuhteet	<ul style="list-style-type: none">•Vesivalumat•Biologiset vauriot<ul style="list-style-type: none">• Sisäilmaongelmat•Fysikaaliset vauriot•Kemialliset vauriot

Kuva 8. PVC-katon kosteusteknisen toimivuuden varmistaminen edellyttää kosteusrasitusten hallintaa, katon kuivumiskykyä ja kosteuden aiheuttamien haittojen minimointia.

PVC-kattojen kosteusteknisen toimivuuden arviointi perustuu kosteuslähteisiin, katon kuivumiskykyyn sekä kosteuden aiheuttamiin haittoihin. Eri tekijöiden keskinäinen vaikutus on ratkaiseva katon pitkäaikaisen kosteusteknisen toimivuuden kannalta.

5.2 Kosteuden aiheuttamat haitat

Kosteus voi aiheuttaa PVC-katossa fysikaalisia, biologisia ja kemiallisia vaurioita [15, s.30 - 31] sekä vesivalumia. Kosteuden aiheuttamia fysikaalisia haittoja lämmöneristeessä on lujuuskato, mitä kutsutaan myös kosteuskorroosioksi, sekä lämmönjohtavuuden kasvu. Biologinen haitta on esimerkiksi mikrobikasvu ja kemiallinen haitta liimojen kiinnityksien irtoaminen. PVC-katoissa käytetään lämmöneristeen mekaanista kiinnitystä, jolloin kiinnityksien irtoaminen ei ole ongelma. Lämmöneristeen kosteudenkestävyyttä on käsitelty kappaleessa 5.8.2.

Vesivalumat ovat umpirakenteissa tyypillisiä ongelmatilanteita. PVC-katto on luonteeltaan umpinainen, vaikka katto olisi uratuuletettu. Umpirakenteissa kosteus siirtyy rakenteen sisällä vesihöyrynä ja tiivistyessään vedeksi saattaa synnyttää valumia. Lämmöneristeen kosteus määrän ei tarvitse olla yli hygroskooppisen alueen, jotta valumia voi syntyä. Valuessaan vesi siirtyy pinnan kaltevuuden määräämällä. Tästä syystä valumia esiintyy eniten jyrkissä katoissa, jollaisia voi olla esimerkiksi PVC-katetut urheiluhallit. Loivissa katoissa valumat suuntautuvat katon jiiriin, eivätkä ne välttämättä siir-

ry sisätiloihin. Poimulevykatoissa valumat voivat edetä poimujen pohjalla. Valumat voivat johtua lisäksi kylmäsilloista, jolloin kondenssi syntyy sisäilman kosteudesta.

Korkea rakennuskosteuden määrä lisää valumariskiä, koska se muun muassa kasvattaa katteen alla jäätyvää vesimäärä. Veden sulaessa ja valuessa alaspäin lämmöneriste pysyy sitomaan tietyn määrän kosteutta, mihin vaikuttaa myös kosteuden sulamisnopeus. Yleisesti ottaen PVC-kattojen lämmöneristeillä on alhainen kyky sitoa kosteutta. Nopea ulkoilman lämpötilan nousu lisää vesivalumien todennäköisyyttä. Vesivalumia voidaan estää vesitiiviillä höyrynsululla tai varmistamalla katon hyvä kuivumiskyky, mikä vähentää tiivistyvän veden määrää.

5.3 Rakennuskosteus

Rakennuskosteudella tarkoitetaan kosteutta, joka poistuu rakenteesta sen kuivuessa kohti tasapainotilaa. Rakenteeseen tämä kosteus siirtyy valmistus-, varastointi-, kuljetus- tai rakennusvaiheessa. Betonin rakennuskosteus on yksi merkittävimmistä kosteuslähteistä rakenteissa, mikä tulee aina huomioida rakenteen kuivumisen arvioinnissa. Rakennuskosteutta on sekä betonielementeissä, että paikalla valetuissa betonirakenteissa. PVC-katoissa betonin kosteus vaikuttaa lähinnä kantavan rakenteen kosteutena, joka voi siirtyä ylöspäin lämmöneristekerrokseen diffuusiolla, mikäli höyrynsulku ei ole tiivis. Betonista kuivuva kosteusmäärä on luokkaa 60 - 95 kg/m³ vesisementtisuhteilla 0,3 - 0,7 [19, s.493]. Paksuudeltaan 400 mm betonilaatalla kosteusmäärä on 24 - 38 kg/m². Bitumikermi tai muu vesihöyrytiivis höyrynsulkumateriaali estää tehokkaasti kosteuden siirtymisen betonilaatasta ylöspäin. PVC-katoissa käytetyistä muista materiaaleista ei yleensä ilmoiteta kirjallisuudessa rakennuskosteuden arvoja, sillä niiden rakennuskosteudet ovat alhaisia.

Kosteussuojauksella kuljetus- ja rakennusvaiheessa voidaan alentaa rakennuskosteuden määrää merkittävästi, sillä PVC-kattojen merkittävin rakennuskosteuden lähde on sade. Rakennusvaiheessa on aina käytettävä sääsuojia. Jos kiinteitä sääsuojia ei voida käyttää, käytetään siirrettäviä sääsuojia. Täydellinen sääsuojaus on kuitenkin suositeltavaa erityisesti saneerauskohteissa. PVC-katoissa voidaan työn keskeydyttyä sulkea kesken-eräinen katto vesitiiviillä väliaikaisella suojalla, kuten kuvassa 9 on esitetty. Vesitiivis suojaus ei siirry lämmöneristeen päältä tuulella. Toinen vaihtoehto on käyttää siirrettäviä pressuja, kuten kuvassa 10 on tehty. Sääsuojaus vaikuttaa katon kuivumisaikaan merkittävästi ja on sitä tärkeämpi, mitä heikompi katon kuivumiskyky on.



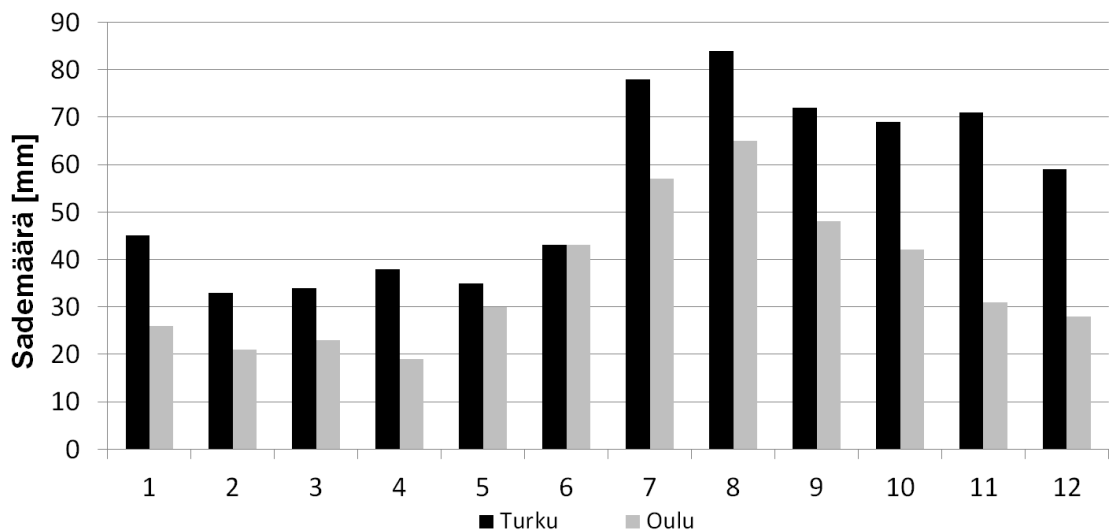
Kuva 9. PVC-katon rakennustyön keskeydyttyä varmin kosteussuojaus on käyttää vesitiivistä ratkaisua. Kuvassa on asennettu PVC-kermi vesitiiviisti höyrinsulkuun bitumiliimauksella. Lämmöneristeen PVC-kate on asentamatta sääsuojauksen viimeistelemiseksi.



Kuva 10. Rakennusvaiheessa katto on suojattava sateelta töiden keskeytyessä. Yöllä sääsuojan ylä- ja alapintaan kondensoitua ilmankosteus lisää rakennuskosteutta (oikea kuva). Kondenssin vaikutus rakennuskosteuden määrään on kuitenkin vähäinen. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyy kenttä-tutkimukseen liittyvä kastelujärjestelmä.

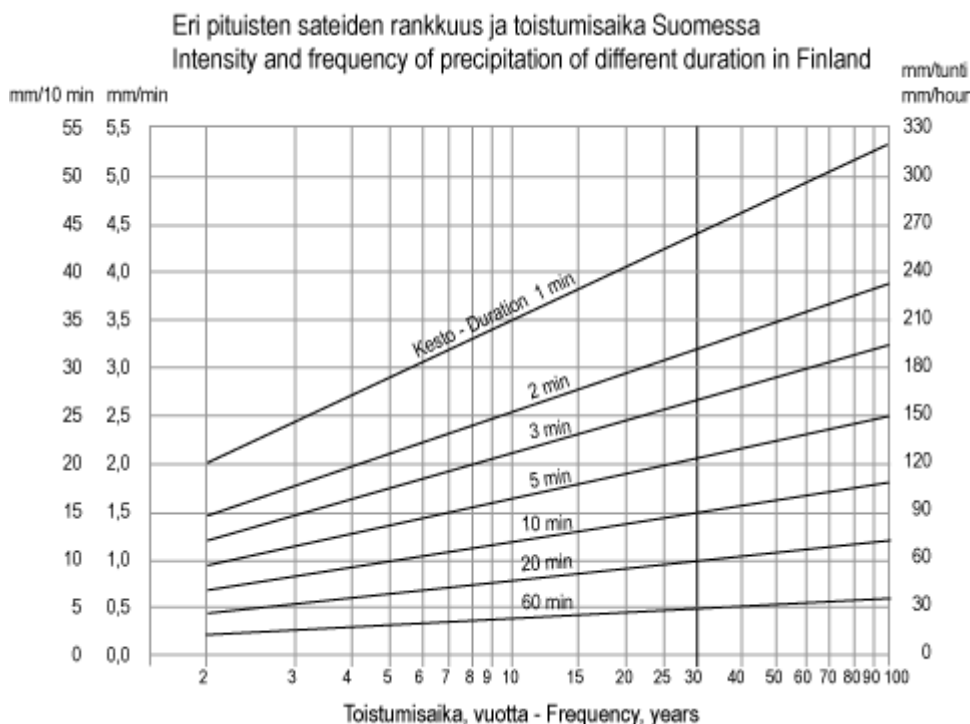
Rakennusvaiheessa esiintyvät sateet ovat sitä vahingollisempia, mitä lähempänä katon rakentamista ne ajallisesti esiintyvät. Kesällä sadevesi kuivuu kattopinnalta, mutta talvisin sadevesi tai lumi poistuu hitaammin kantavan rakenteen päältä. Sadevesien poistoa tehostetaan rakennusvaiheessa puhaltamalla ja lastaamalla vesi kattokaivoihin ennen eristeiden asennusta. Myös lumi poistetaan ennen lämmöneristämistä ja katteen asennusta. Jatkuvien sateiden aikana on kuitenkin mahdotonta välttää rakennuskosteutta.

Sateiden todennäköisyyttä voidaan arvioida sadetilastojen perusteella. Kuvassa 11 on esitetty kuukausittaisia sademääriä Suomessa [15, s.37]. Turun vuosittainen sademäärä on 662 mm ja Oulun 433 mm. Tilastojen perusteella vuoden jälkimmäisellä puoliskolla sateen todennäköisyys on noin kaksinkertainen verrattuna alkuvuoteen.



Kuva 11. Kuukausittaiset keskimääräiset sademäärät Turussa ja Oulussa 1961–1990 [15, s.37]. Suurin osa sateesta tulee Suomessa lumena.

Sademäärien ennustetaan nousevan lähitulevaisuudessa merkittävästi. Ennusteiden mukaan sademäärän vuosikeskiarvo kasvaa Suomessa vuoteen 2040 mennessä noin 7 % ja vuoteen 2080 mennessä noin 11 - 17 % verrattuna ajanjakson 1971–2000 sademääriin [2]. Kuvassa 12 on esitetty kuvaaja harvinaisten sateiden toistumistiheyksistä Suomessa [30]. Vastaava kuvaaja on esitetty myös toisessa lähteessä [4, s.101]. Kuvaajan perusteella sademäärältään 2 - 15 kg/m² sateita esiintyy joka toinen vuosi. Esimerkiksi ylimmältä käyrältä voidaan lukea, että 2 vuoden toistumisajalla esiintyy 2 mm sade kestoltaan 1 minuuttia, jolloin sademäärä on 2 kg katoneliölle. Pahin tilanne voimakkaan sateen kannalta on hetki, jolloin lämmöneristeet on levitetty katolle, sillä satavaa kosteutta ei voida enää puhaltaa kattokaivoihin.



Kuva 12. Voimakkaiden sateiden toistumisaika tietyssä pisteessä [30]. Kuvaajaa voidaan hyödyntää rakentamisajan sadeolojen riskien arviointiin.

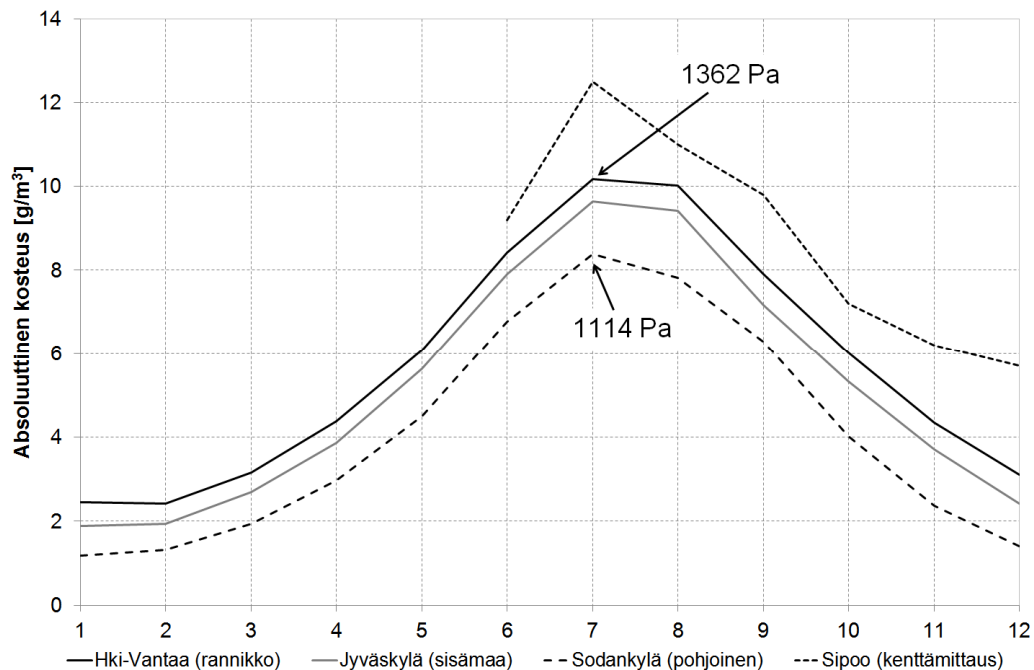
Sateen haittojen ehkäisemiseksi kattorakentamisessa käytetään hyväksi lyhyen ajan sääennusteita, joiden avulla vältetään rakentamista sateen aikana. Rakennuskosteuden täydellinen ehkäisy vaatii pitkiä sateettomia jaksoja. Rakentamisen aikataulut ovat usein niin tiukat, ettei sateettomia olosuhteita voida saavuttaa. Sadesuojauksellakaan ei täysin voida estää rakennuskosteutta.

Rakennusmateriaalit asettuvat kosteustasapainoon ympäristönsä kanssa. Siksi materiaaleihin voi siirtyä rakennuskosteutta suoraan ilmasta, jos materiaalia säilytetään kosteammassa ilmassa, kuin missä materiaali tulee olemaan rakenteessa. Lämmöneristeen kosteustasapaino riippuu myös lämpötilasta, joten asentamalla lämmöneriste lämpimällä säällä voidaan alentaa eristeessä olevan kosteuden määrää noin 20 % (taulukko 28). Myös kapillaarisuus tulee ottaa huomioon rakennuskosteuden hallinnassa. Materiaalit tulee nostaa kosteasta maapinnasta lavoilla tai muuten toimivilla nostopaloilla. Lisäksi sadeveden kapillaarinen imeytyminen eristeeseen tulee estää. PVC-katoissa käytettävät eristeet eivät ime kosteutta merkittävästi kapillaarisesti, joten tärkeintä on poistaa rakennusvaiheessa eristeiden alle pääsevä kosteus.

5.4 Rakennetta ympäröivät kosteusolosuhteet

PVC-katon kosteusliikkeisiin vaikuttaa ratkaisevasti rakennetta ympäröivän ilman kosteus. Katto rajoittuu ylä- ja alapuoleltaan ulko- ja sisäilmaan. Ulko- ja sisäilman kosteustasot ja niiden suhde verrattuna katon lämmöneristeen kosteustasoon määrittää siirtyykö kattoon kosteutta vai kuivuuko katto. Kosteuden siirtymismuodoista tärkeimmät ovat diffuusio ja konvektio.

Ulkoilman kosteusolosuhteisiin ei voida vaikuttaa. Maantieteellisesti ulkoilman sisältämä kosteuspäästö vaihtelee paikkakunnan sijainnin mukaan [15. s.36]. Kuvassa 13 on esitetty absoluuttisen kosteuden vaihtelu vuoden aikana Helsingissä, Jyväskylässä ja Sodankylässä sekä kenttätutkimuksessa mitattu ulkoilman absoluuttinen kosteus. Rannikolla on kosteampaa kuin sisämaassa tai pohjoisessa. Toisaalta pohjoisessa rannikolla ei ole niin kosteaa kuin etelässä rannikolla. Oulun olosuhteet vastaavat jotakuinkin sisämaan olosuhteita.



Kuva 13. Ulkoilman sisältämä kosteuspäästö vaihtelee vuoden aikana. Paikkakunnan sijainti vaikuttaa kosteustasoon. Vesihöyrystinpainetta on esitetty laskelmien arvioinnin helpottamiseksi.

Sisäilman sisältämä kosteusmäärä riippuu rakennuksen käyttötarkoituksesta. Taulukossa 5 on esitetty kuivien ja kosteuden tilojen ilman kosteustasoja. Sisäilmassa on lähes aina enemmän kosteutta kuin ulkoilmassa.

Taulukko 5. Sisäilman sisältämä kosteusmäärä riippuu rakennuksen käyttötarkoituksesta. Taulukossa esitetty lämpötila, suhteellinen kosteus, absoluuttinen kosteus ja vesihöyryn osapaine.

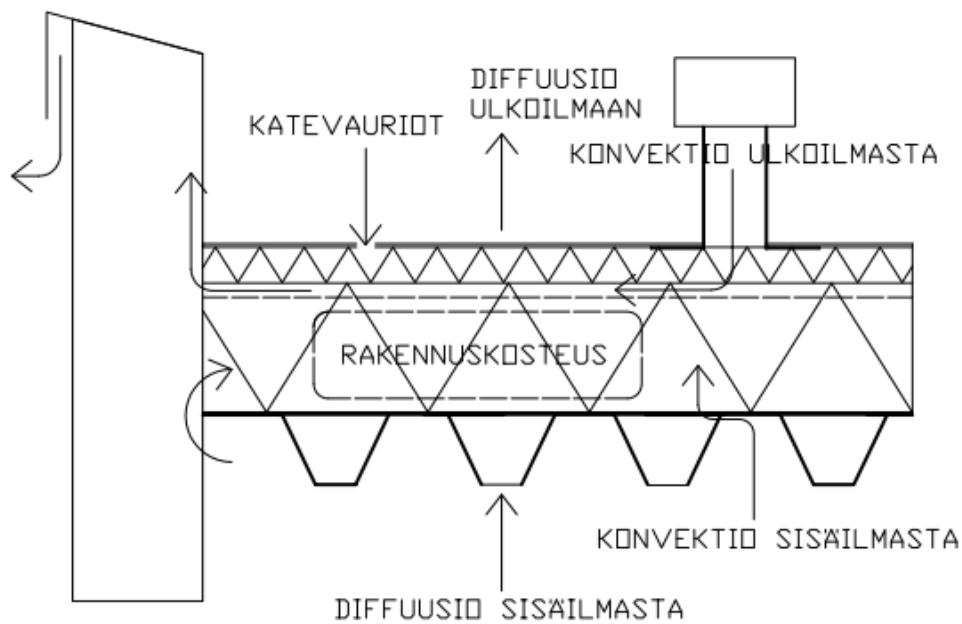
Käyttötarkoitus	Lämpötila T [°C]	Suhteellinen kosteus ϕ [%]	Absoluuttinen kosteus v [g/m ³]	Vesihöyryn osapaine p_{vh} [Pa]
Asuinrakennus	20	50	8,6	1168,9
Koulu	20	60	10,4	1402,7
Ravintola	20	70	12,1	1636,5
Leipomo	20	80	13,8	1870,2
Uimahalli	25	90	20,7	2847,3
Paperikonehalli	30	90	27,3	3815,3

Taulukon 5 arvot ovat vakioita läpi vuoden, mutta todellisuudessa kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan. Vaihtelun suuruus riippuu esimerkiksi siitä, kuinka hallittu sisäilman kosteustaso on ilmanvaihdon avulla.

Rakennetta ympäröivien kosteusolosuhteiden perusteella voi yksinkertaistetusti sanoa, että sisäilman kosteuden siirtyminen kattoon tulee estää, kun taas ulkoilma kuivattaa kattoa. Seuraavissa kappaleissa käsiteltyjen kosteudensiirtymisilmiöiden suunta on valittu edellä esiteltyjen reunaehtoien mukaan. Kattoa kasteleva diffuusio ja konvektio (ilmavuodot) tapahtuu sisäilmasta, kun taas kuivattava diffuusio ja konvektio (uratuuletus) tapahtuu ulkoilmaan. Kappaleessa 5.6.4 käsiteltävä pumppausvaikutus kastelee tai kuivattaa kattoa riippuen höyrinsulun ilmatiiveydestä.

5.5 Kosteudensiirtymismuodot ja kosteuslähteet

Käytönaikaiset kosteuslähteet tarkoittavat kosteutta, joka siirtyy valmiiseen kattoon sen elinkaaren aikana diffuusiolla tai konvektiolla ulko- tai sisäilmasta. Lisäksi kattovuodot kuuluvat tähän ryhmään. Käytönaikaiset kosteuskuormat pyritään lähtökohtaisesti minimoimaan höyryn- ja ilmansuluilla, mutta täydellisesti diffuusiota tai konvektiota ei yleensä voida estää.



Kuva 14. PVC-katon käytönaikaiset kosteusrasitukset, kuivumistavat ja rakennuskosteus.

Käytönaikaisten kosteuskuormien arvioidaan nousevan, kun kasvavat sademäärät nostavat ulkoilman ja samalla sisäilman kosteutta [2]. PVC-katon kohdalla ilmastomuutos vaikuttaa eniten katon kykyyn poistaa rakennuskosteus diffuusiolla ulkoilmaan. Tuuletuksen aiheuttama ilmavirtaus ei todennäköisesti kuitenkaan aiheuta kasvavaa kosteusrasitusta.

5.5.1 Kosteuden diffuusio

Diffuusiolla kattoon siirtyvän kosteuden suuruus riippuu osaltaan sisäilman kosteudesta. PVC-katetta käytettäessä tilan käyttötarkoitus voi vaihdella laajalti. Normaalina sisäilman kosteutena pidetään 40 - 60 %. Teollisuusrakennuksissa tuotantoprosessit voivat nostaa sisäilman suhteellisen kosteuden jopa 90 % tasolle. Kylpylöissä ja uimahalleissa suhteellinen kosteus voi olla jopa tätä korkeampi. Jos lämpötila on samanaikaisesti korkea, ilman sisältämä vesihöyrymäärä on suuri. Sisäilman olosuhteita on esitetty taulukossa 5.

Diffuusio perustuu kaasujen pitoisuuserojen tasoittumiseen siten, että korkeammasta pitoisuudesta siirtyy molekyylejä matalamman pitoisuuden suuntaan. Vesihöyryn diffuusio huokoisessa materiaalissa noudattaa Fickin lakia kaavan 7 mukaisesti.

$$g_{dif} = -\delta_v \frac{dv}{dx} \quad (7)$$

missä g_{dif} on kosteusvirta diffuusiolla [$\text{kg/m}^2/\text{s}$], δ_v on kosteudensiirtokerroin [m^2/s], dv on vesihöyrynpitoisuusero [kg/m^3] ja dx diffuusiovirran kulkema matka [m]. Yhtälön negatiivinen etumerkki on määritetty siten, että diffuusio x-suunnassa oikealle on positiivista. Kosteudensiirtyminen voidaan laskea myös vesihöyrynpaineen avulla, jolloin tarvittava kerroin voidaan ratkaista yhtälöstä 8.

$$\delta_v = 461,4 * T * \delta_p \quad (8)$$

missä T on lämpötila [K]. Tasapainotilassa kaava 7 voidaan esittää muodossa:

$$g_{dif} = \frac{v_1 - v_2}{Z_v} \quad (9)$$

missä v_1 ja v_2 ovat vesihöyrynpitoisuudet tarkastelupisteissä 1 ja 2 [kg/m^3] ja Z_v on kosteudenläpäisyvastus [s/m]. Kaavoissa 7 ja 9 vesihöyrynpitoisuutena voi olla myös vesihöyrynpaine [Pa]. Kosteudenläpäisyvastus saadaan kaavasta:

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (10)$$

missä d on pisteiden 1 ja 2 välinen etäisyys [m]. Kaava pätee myös vesihöyrynvastukselle Z_p ja vesihöyrynläpäisevyydelle δ_p .

Vesihöyrynläpäisevyys riippuu lämpötilasta ja ilman kokonaispaineesta siten, että lämpötilan nousu lisää diffuusiota, kun taas ilmanpaineen nousu vähentää diffuusiota. Tämän voi päätellä liitteessä 5 esitetystä vesihöyrynpaineen diffusiviteetin D_p kaavasta.

Kattojen eristyspaksuudet ovat kasvaneet merkittävästi lämmöneristysvaatimuksien kiristytessä viime vuosikymmeninä. Kivivillojen kohdalla tämä ei vaikuta oleellisesti kosteuden diffuusioon rakenteessa ja siitä ulos, sillä kivivillan vesihöyrynläpäisevyys on suuri verrattuna PVC-katteeseen. Solumuovieristeet saattavat hidastaa katon kuivumista diffuusiolla.

Kosteudensiirtymistä sisäilmasta diffuusiolla yläpohjaan selvitettiin laskennallisesti edellä esitetyillä kaavoilla. Diffuusiovirran suuruus sisäilmasta lämmöneristekerroksen alaosaan laskettiin riippuen höyrynsulusta ja sisäilman kosteudesta. Sisäilman olosuhteina käytettiin kuivia ja kosteita tiloja, joten suhteellinen kosteus vaihteli välillä 50 - 90 % taulukon 5 mukaisesti. Sisäilman lämpötila vaihteli välillä 20 - 30 °C. Lämmöneristeen lämpötilaksi oletettiin 15 °C, mutta useimmiten lämpötila on tätä korkeampi. Las-

ketu diffuusiiovirran suuruus on suurempi, kuin mitä useimmassa tapauksessa todellisuudessa. Suhteellisen kosteuden arvona höyrinsulun päällä käytettiin tutkimukseen liittyvien kenttämittausten perusteella 68 %. Arvo määritettiin kostean ja kuivan tutkimusalueen höyrinsulun päältä mitattujen kosteuksien keskiarvona kesä-marraskuussa. Höyrinsulkujen vesihöyrinvastukset on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 6. Vesihöyrin diffuusiiovirran laskenta sisäilmasta kattoon.

Sisäilman olosuhteet			(15 °C, 68%)	Kosteusvirta diffuusiolla			
T _s	RH _s	p _s	p _{mv}	PE-kalvo / TL4	TL2	Euratex-AL	TL4+Al
[C]	[%]	[Pa]	[Pa]	[kg/m ² s]	[kg/m ² s]	[kg/m ² s]	[kg/m ² s]
20	50	1168,9	1162,4	1,3E-11	4,1E-12	2,6E-12	6,5E-13
20	60	1402,7	1162,4	4,8E-10	1,5E-10	9,6E-11	2,4E-11
20	70	1636,5	1162,4	9,5E-10	3,0E-10	1,9E-10	4,7E-11
20	80	1870,2	1162,4	1,4E-09	4,4E-10	2,8E-10	7,1E-11
25	90	2847,3	1162,4	3,4E-09	1,1E-09	6,7E-10	1,7E-10
30	90	3815,3	1162,4	5,3E-09	1,7E-09	1,1E-09	2,7E-10
				Diffuusiolla siirtyvä kosteus määrä [g/m ²] 30 päivässä			
20	50	1168,9	1162,4	0,0	0,0	0,0	0,0
20	60	1402,7	1162,4	1,2	0,4	0,2	0,1
20	70	1636,5	1162,4	2,5	0,8	0,5	0,1
20	80	1870,2	1162,4	3,7	1,1	0,7	0,2
25	90	2847,3	1162,4	8,7	2,7	1,7	0,4
30	90	3815,3	1162,4	13,8	4,3	2,8	0,7

Taulukon 6 perusteella voidaan sanoa, että vesihöyrin diffuusio kattoon on hyvin vähäistä riippumatta höyrinsulusta tai sisäilman olosuhteista. Laskennassa ei huomioitu kantavan rakenteen vaikutusta kosteuden siirtymiseen. Esimerkiksi 400 mm vahvuisen betonilaatan vesihöyrinvastus on noin 40 % polyeteenikalvon vesihöyrinvastuksesta, joten yksinkertaistus ei vaikuta tuloksiin merkittävästi, kun huomioi diffuusiiovirran vähäisyyden. Poimulevykatoissa diffuusio on taulukon 5 tuloksia jonkin verran alempi riippuen poimulevyn ilmatiiviyydestä. Jos poimulevyjen saumat ovat hyvin epätiivit tai levyn uumat on rei'itetty, ei levy vaikuta diffuusioon merkittävästi.

5.5.2 Kosteuden konvektiovirtaus

5.5.2.1 Yleistä kosteuden konvektiovirtauksesta

Toinen keskeinen kosteudensiirtymismekanismi rakenteissa on konvektio. Konvektiossa kosteus siirtyy ilmavirtauksen mukana. Konvektio vaatii tapahtuakseen ilmavirtauksen, kun taas diffuusio tapahtuu vesihöyrin konsentraatioeron vaikutuksesta. Kosteutta siirtyy yleensä konvektiolla suurempia määriä kuin diffuusiolla [4, s.116], mistä syystä ilmavirtauksien estäminen on perusedellytys rakenteiden toimivuudelle. Konvektio voi

siirtää kosteutta samaan tai eri suuntaan kuin diffuusio. Kuvassa 14 on esitetty yläpohjaan vaikuttavia konvektiovirtauksia.

Konvektio voi joko kastella tai kuivata rakennetta. Kylmän ilman siirtyessä lämpimään tapahtuu kuivumista ja lämpimän ilman siirtyessä kylmään tapahtuu kosteuspitoisuuden nousua ja tiivistymistä. Konvektiota voidaan täten käyttää hyväksi kuivattamaan rakenteita, tai se voi johtaa kosteusvaurioihin. Esimerkiksi ulkoseinien tuuletusvälit, kattojen tuuletustilat ja ryömintätilojen tuuletus ovat ratkaisuja, joissa konvektiolla kuivataan rakennetta. Esimerkiksi ryömintätiloissa ulkoilmalla tapahtuvan konvektion vaikutus voi olla sekä kasteleva tai kuivattava, ja se riippuu vuodenajasta. Katoissa konvektio sisäilmasta on yleensä kasteleva ja konvektio ulkoilmasta kuivattava.

5.5.2.2 Konvektion laskentamenetelmiä

Konvektiolla siirtyvän kosteusvirran suuruus voidaan laskea kaavalla 11.

$$g_{konv} = v * q_v \quad (11)$$

missä g_{konv} on kosteusvirta [kg/s], v on vesihöyrypitoisuus [kg/m³] ja q_v on ilmavirta [m³/s]. Kosteusvirta konvektiolla [kg/s] tarkastelualueella voidaan laskea kaavalla 12.

$$g_{kuiv} = (v_{sis} - v_{ulos}) * q_v \quad (12)$$

missä v_{sis} on tarkastelualueelle tulevan ilman kosteus [kg/m³] ja v_{ulos} on poistuvan ilman kosteus [kg/m³]. Termi $(v_{sis} - v_{ulos})$ on positiivinen jos sisään virtaa kosteampaa ilmaa kuin rakenteessa, jolloin kosteusvirta kastelee rakennetta. Jos termi on negatiivinen, kosteusvirta kuivattaa rakennetta.

Kaavojen 11 ja 12 käyttäminen edellyttää ilmavirtauksen suuruuden määrittämistä. Ilmavirtaukset syntyvät virtausreitistä ja paine-erosta virtauksen alku- ja loppupään välillä. Lisäksi tarvitaan väliaine eli ilma. Taulukossa 7 on esitetty konvektiovirtauksen syntymisen edellytykset ja niiden syyt.

Taulukko 7. Kattorakenteeseen tapahtuvan konvektiovirtauksen edellytykset ja niiden syyt. Virtauksen vaatima väliaine löytyy aina rakennuksista.

Konvektion edellytykset	Syy tekijän ilmenemiseen
Paine-ero	Ilmanvaihdon painesuhteet, rakennuksen ja ympäristön geometria (tuuli), savupiippuvaikutus, auringonpaiste, pumppausvaikutus
Virtausreitti	Lämmöneristeen, höyrynsulun, rakenneliitosten tai läpivientien epätiivit saumat, katon tuuletus (epätiivis höyrynsulku)

Rakennuksen ympärillä, rakennuksessa ja rakenteissa virtauskenttä on monimutkainen johtuen virtauksen turbulentsisuudesta. Kuitenkin ilmavirtauksen suuruutta voidaan arvioida yksinkertaisilla laskukaavoilla. Kosteuskonvektio voi tapahtua raoissa, rei'issä tai materiaalin huokosissa. Kaavalla 13, Poiseullen yhtälöllä, voidaan arvioida ilmavirtaus [m³/s] kapeassa raossa esimerkiksi yläpohjan ja seinien liitoksessa tai yläpohjan elementtisaumoissa.

$$q_v = \frac{b^2 * A_r}{12\eta} * \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (13)$$

missä b on raon korkeus [m], A_r on virtauksen poikkipinta-ala [m²], Δp on paine-ero raon eri puolilla [Pa], η on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti [Ns/m²] ja Δx on virtausmatka [m]. Kaava 13 pätee kun virtaus on laminaarista eli Reynoldsin luku on alle 2300. Reynoldsin luku [-] lasketaan kaavalla 14.

$$Re = \frac{v * D}{\nu} = \frac{v * D * \rho}{\eta} \quad (14)$$

missä v on virtausnopeus [m/s], D on hydraulinen halkaisija [m], ν on virtaavan aineen kinemaattinen viskositeetti [m²/s] ja ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m³]. Hydraulinen halkaisija on raon tapauksessa 2*b. Yleisesti virtauksen poikkipinta-alan hydraulinen halkaisija arvioidaan kaavalla 4*(ala/piiri). Reynoldsin luku 1 mm x 1 m rakovirtauksessa, kun ilman lämpötila on 20 °C ja virtausnopeus 0,1 m/s, on 13 eli virtaus on selvästi laminaarista. Virtauksen muuttuminen turbulentiksi vaatii tässä tapauksessa virtausnopeuden, raon leveys tai virtaavan ilman tiheyden kasvua. Jos pelkästään raon leveys muuttuisi, tapahtuisi muutos turbulentiksi vasta lähes 200 mm raon leveydellä. Yleensä raon kautta tapahtuva ilmapuoto rakenteessa on siis laminaarista [19, s.380]. Höyrynsulkua läpäisevien reikien kautta tapahtuva ilmavirtaus [m³/s] voidaan laskea Dickin kaavalla [19, s.382]:

$$q_{v,HS} = A * \mu * \sqrt{\frac{2}{\rho_w}} * \sqrt{\Delta p} \quad (15)$$

missä A on virtausreiän ala [m²], μ on siirtokerroin [-], ρ_w on virtaavan aineen tiheys [kg/m³] ja Δp on paine-ero [Pa]. Kaava soveltuu tapauksiin, joissa virtausmatka on pieni ja virtausvastus määräytyy sisään- ja ulosvirtauksesta. Kaava 15 voidaan sieventää olettamalla siirtokertoimeksi 0,65 [19, s.382] ja ilman tiheydeksi 1,25 kg/m³:

$$q_{V.HS.reikä} = 0,8 * A * \sqrt{\Delta p} \quad (16)$$

missä A on reiän pinta-ala [m²] ja Δp on reiän yli vaikuttava paine-ero [Pa]. Höyrynsulun limitettyjen saumojen kautta siirtyvä ilmavirta [m³/s] voidaan laskea kaavalla 17 [31, s.4].

$$q_{V.HS.sauma} = 2 * 10^{-7} * L * \Delta p^{0,75} \quad (17)$$

missä L on sauman pituus [m]. Lisäksi voidaan tarkastella ilmavirtausta materiaalin huokosissa [m³/s], joka saadaan Darcyn lailla [19, s.377].

$$q_{V.huok} = A * \frac{k}{\eta} * \frac{\Delta p}{L} \quad (18)$$

missä A on virtausta vastaan poikittainen pinta-ala [m²], k on materiaalin permeabiliteetti [m²], η on ilman keskimääräinen dynaaminen viskositeetti [Ns/m²], Δp on paine-ero materiaalin yli [Pa] ja L on virtausmatka [m]. Huokosvirtausta käsitellään kenttätutkimuksen yhteydessä.

Virtauksen laskennassa käytettävä paine-ero on vaikea määrittää tarkasti, sillä tarkasteltaessa virtausta sisältä eristetilaan tarvitaan paine-ero näiden pisteiden välillä. Riippuen kattorakenteesta tämä paine-ero on vähemmän kuin katon yli vaikuttava paine-ero. Esimerkiksi tuulettumattomassa katossa paine-ero on selvästi alempi höyrynsulun yli kuin koko rakenteen yli, mutta tuuletetussa katossa suuri osa paine-erosta voi vaikuttaa höyrynsulun yli. Tämän vuoksi uratuuletetun PVC-katon höyrynsulun on oltava ilmatiivis. Myös muut rakennekerrokset ja niiden ilmanläpäisevyys vaikuttavat painejakaumaan, kuten kantava rakenne ja lämmöneriste. Tarkka painejakauman selvittäminen vaatii samanaikaisia paine-ero mittauksia useasta pisteestä rakennetta.

Paine-ero katon yli syntyy yhdistämällä tuulen, lämpötilaerojen ja ilmanvaihdon vaikutus painesuhteeseen. Tuulen aiheuttama paine-ero [Pa] kattoon voidaan laskea kaavalla 19.

$$\Delta p_{tuuli} = (\mu_u - \mu_s) \frac{\rho}{2} * v_t^2 \quad (19)$$

missä μ_u ja μ_s ovat rakennuksen geometriasta riippuvat ulko- ja sisäpuolen muotokertoimet [-], ilman tiheys $[\text{kg/m}^3]$ ja v_t on tuulen nopeus $[\text{m/s}]$. Kaavan 19 käyttäminen edellyttää kokeellisten muotokertoimien ja tuulennopeuden tietämistä. Kattoon kohdistuvia muotokertoimia tasakattoisissa rakennuksissa on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Tasakaton muotokertoimia.

Katon muotokerroin μ_u (< 1 : virtaus sisäilmasta kattoon)	Rakennuksen geometria (pituus x leveys x korkeus)	Tuulen tulokulma seinään nähden	Lähde
-0,5	1 x 1 x 0,5	90° kulmassa	[19, s.393]
-0,7-(-0,6)	4 x 1 x 1	90° kulmassa pitkään sivuun	[32, s.125]
-2,0-(-0,5)	4 x 1 x 1	45° kulmassa pitkään sivuun	[32, s.125]
sisätilan muotokerroin μ_s -0,3			

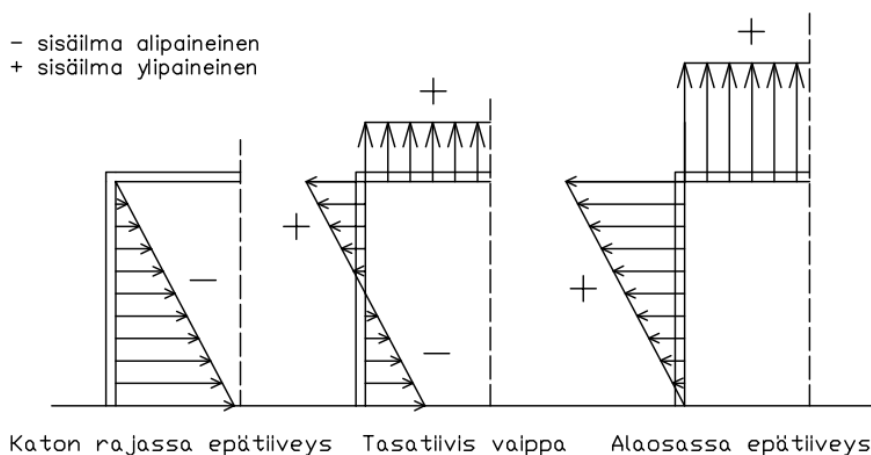
Suurimmat paine-erot kohdistuvat katossa kulma-alueille ja tuulenpuoleiselle osalle kattoa. Muotokertoimia on esitetty lisäksi lähteessä [33], missä tasakaton muotokerroin vaihtelee välillä -1,8...0,2. Monimutkaisten rakennusten tapauksessa tuulen aiheuttama paine-ero voidaan mitata tai laskea virtausmekaniikan keinoin.

Tuulennopeuksien vuosikeskiarvo Suomessa vaihtelee välillä 2,4 - 5,7 m/s. Rannikolla tuulee enemmän kuin sisämaassa, ja rannikolla tuulisuus vaihtelee hieman vuodenajan mukaan. Sisämaassa tuulisuus on tasaisempaa läpi vuoden ja tuulen keskinopeus on 3 - 4 m/s. [4, s.15] Tuulennopeuden vuosikeskiarvo 30 metrin korkeuteen asti rannikolla Helsingin keskustassa on noin 4 m/s ja sisämaassa Sipoossa 2 m/s laskettuna 50 - 400 m korkeuksien tuulennopeuksista [34] polynomisovitefunktiolla. Maastoluokka vaikuttaa kuitenkin tuulennopeuteen, joten tuulen nopeudessa esiintyy paikallisia vaihteluita.

Lämpötilaerojen aiheuttama paine-ero eli savupiippuvaikutus syntyy ulko- ja sisäilman tiheyserosta. Ilman tiheys puolestaan riippuu ilman lämpötilasta. Savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-ero $[\text{Pa}]$ ulkoilman ja sisäilman välillä saadaan kaavalla 20.

$$\Delta p_{SPV} = g * \Delta \rho * h = 9,81 \frac{m}{s^2} (\rho_u - \rho_s) h = 9,81 \frac{m}{s^2} \left(\frac{353}{T_u} - \frac{353}{T_s} \right) h \quad (20)$$

missä g on gravitaatiovakio $9,81 [\text{m/s}^2]$, T_u on ulkoilman lämpötila $[\text{K}]$, T_s on sisäilman lämpötila $[\text{K}]$ ja h on rakennuksen korkeus $[\text{m}]$. Kaavalla 20 laskettu seinään kohdistuva paine-ero on joko ylipainetta, alipainetta tai kumpaakin riippuen ulkoseinän tiiveydestä. Kattoon kohdistuva paine-ero voi tällöin olla kaavan 20 tulos, nolla tai jotain siltä väliltä. Kuvassa 15 on esitetty periaatekuva savupiippuvaikutuksen katoon aiheuttamasta ylipaineesta. Suurin ylipaine kattoon syntyy tilanteessa, missä rakennuksen alaosassa on epätiivelyskohta. Tällainen tilanne on usein onneksi vain hetkellinen. Kuvassa ei ole huomioitu tuulen tai ilmanvaihdon vaikutusta painejakaumaan.

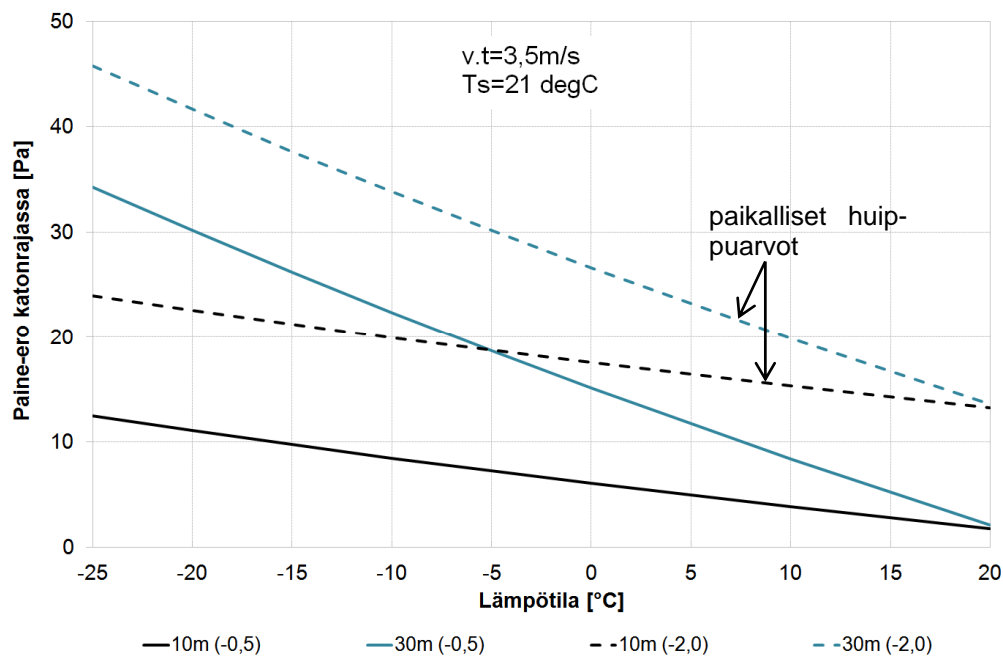


Kuva 15. Savupiippuvaikutuksen aiheuttama ylipaine kattoon on suurin, jos rakennuksen alaosassa on epätiivieyskohta tai avonainen kulkutie.

Tarkasteluissa voidaan olettaa tasatiivis vaippa, jos vaipan tiiveydestä ei ole tarkempaa tietoa. Savupiippuvaikutuksen suuruusluokka vaihtelee vuodenajan mukaan ja on suurin talvella, kun ulkoilman tiheys on suurimmillaan.

5.5.2.3 Laskennalliset paine-erot ja kosteuden konvektiovirtaus

Edellä esitettyjen ilmavirtauksen ja paine-eron laskentakaavojen perusteella arvioitiin yläpohjaan kohdistuvaa paine-eroa ja sen aikaansaamaan kosteuskonvektion suuruusluokkaa. Kuvassa 16 on esitetty sisäilman ylipaine tasatiiviissä vaipassa, mikä kuvaa usein hyvin keskimääräistä tilannetta katon rajassa, johtuen savupiippuvaikutuksesta ja tuulesta. Tuulen nopeus on laskennassa 3,5 m/s (keskimääräinen nopeus Suomessa sisämaassa) ulkoilman tiheys $1,25 \text{ kg/m}^3$ ja sisäilman lämpötila $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Sisäilma on tasakatossa aina ylipaineinen katon alapuolella, kun ei huomioida ilmanvaihtoa. Ylipainetta lisääviä tekijöitä ovat kylmä ulkoilma ja rakennuksen korkeus sekä geometria. Tekijöiden keskinäinen merkitys riippuu rakennuksen geometriasta, sillä muotokertoimella -0,5 tuulen osuus on keskimäärin vain 10 % kattoon vaikuttavasta ylipaineesta, mutta kertoimella -2,0 osuus on noin 49 %.



Kuva 16. Yläpohjaan vaikuttava ylipaine sisäilmasta eri rakennuskorkeuksilla, ulkoilman lämpötilalla ja kahdella muotokertoimella. Yksinkertaistetussa laskennassa huomioitu tuulen ja savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-ero. Katkoviivalla on kuvattu ylipaineen paikalliset huippuarvot.

Ylipaine voi kasvaa kuvan 16 tasolta, jos rakennuksen vaippa on epätasaisesti tiivis siten, että alaosissa on epätiiveyskohtia tai avoimia aukkoja (kuva 15). Kosteuskonvektion määrään ei vaikuta pitkällä tähtäimellä se, että kattoon kohdistuu hetkellisesti suuria kosteusvirtoja. Ilmanvaihto voi alentaa ylipainetta, mutta sen vaikutus on rajallinen varsinkin suurissa rakennuksissa. Painejakauma katon korkeudella ei ole tasainen, vaan se vaihtelee räystäältä keskelle kattoa. Katkoviivoitetut käyrät kuvassa 16 kuvaavat paikallisia painehuippuja esimerkiksi rakennuksen katon nurkissa. Kappaleessa 2 käsitellyn 30 m korkean monitoimihallin yläosassa mitattiin ylipaineita 20 - 50 Pa ulkoilman suhteen. 50 Pa paine-ero saattaa syntyä hallin geometriasta, sillä kupolimainen rakenne lisää tuulen aiheuttamaa ylipainetta kupolin huipulla.

Taulukkoon 9 on laskettu kaavojen 13, 16 ja 17 avulla arvioita kosteuskonvektion suuruudesta vuoden aikana. Konvektiolla siirtyvien kosteusmäärien arviointi sisältää aina yksinkertaistuksia. Lämmöneristeen olosuhteet vastaavat diffuusiolaskelmaa kappaleessa 5.5.1. Laskennassa on vertailtu tilan käyttötarkoituksen vaikutusta kosteuskonvektion määrään. Kaavassa 13 oletetaan 400 mm korkea rako ja raon alaksi 1 mm x 1 m, sekä ilman viskositeetiksi sisäilman ja lämmöneristeen lämpötilan keskiarvon mukainen viskositeetti. Kaavassa 16 virtausreitien ala on kahden halkaisijaltaan 3 mm reiän ala, mikä perustuu arvioon höyrynsulkujen lävistyksistä eräässä rakennuksessa [13, s.6].

**Taulukko 9. Kattoon kohdistuvan kosteuskonvektion g_{konv} määriä [kg] vuodessa analyttisillä las-
kukaavoilla. Lämmöneristeen olosuhteet: lämpötila 20 °C, suhteellinen kosteus 68 %.**

1 Asuintalo 20 °C, 50 %				2 Koulu 20 °C, 60 %			
Kaava	13	9	12	Kaava	13	9	12
	HS sau-		HS		HS sau-		HS
	mat	Rakovirtaus	reiät		mat	Rakovirtaus	reiät
dp	per metri	per metri	neliölle	dp	per metri	per metri	neliölle
5	-0,07	-5,7	-2,5	5	-0,03	-2,5	-1,1
10	-0,11	-11,4	-3,5	10	-0,05	-5,0	-1,6
15	-0,15	-17,0	-4,3	15	-0,07	-7,6	-1,9
20	-0,19	-22,7	-5,0	20	-0,08	-10,1	-2,2
25	-0,22	-28,4	-5,5	25	-0,10	-12,6	-2,5
30	-0,25	-34,1	-6,1	30	-0,11	-15,1	-2,7
3 Ravintola 20 °C, 70 %				4 Leipomo 20 °C, 80 %			
Kaava	13	9	12	Kaava	13	9	12
	HS sau-		HS		HS sau-		HS
	mat	Rakovirtaus	reiät		mat	Rakovirtaus	reiät
dp	per metri	per metri	neliölle	dp	per metri	per metri	neliölle
5	0,01	0,6	0,3	5	0,04	3,8	1,7
10	0,01	1,3	0,4	10	0,07	7,6	2,3
15	0,02	1,9	0,5	15	0,10	11,4	2,9
20	0,02	2,5	0,6	20	0,12	15,1	3,3
25	0,02	3,2	0,6	25	0,15	18,9	3,7
30	0,03	3,8	0,7	30	0,17	22,7	4,0
5 Uimahalli 25 °C, 90 %				6 Paperikonehalli 30 °C, 90 %			
Kaava	13	9	12	Kaava	13	9	12
	HS sau-		HS		HS sau-		HS
	mat	Rakovirtaus	reiät		mat	Rakovirtaus	reiät
dp	per metri	per metri	neliölle	dp	per metri	per metri	neliölle
5	0,19	16	7	5	0,3	28	12
10	0,32	32	10	10	0,6	56	17
15	0,43	49	12	15	0,7	84	21
20	0,53	65	14	20	0,9	112	25
25	0,63	81	16	25	1,1	140	28
30	0,72	97	17	30	1,3	168	30

Kosteuskonvektion määrä riippuu voimakkaasti virtausreitistä ja ylipaineesta rakennuk-
sen katon rajassa, mistä syystä ilmiö tulee estää ilmatiiviillä höyrynsululla, esimerkiksi
alustaan liimatulla kumibitumikermillä ja toisaalta sisäilman alipaineistuksella ilman-
vaihdon avulla.

Kattoon vaikuttavaa ylipainetta voi arvioida kuvan 16 perusteella. Lasketut suurimmat
30 Pascalin paine-erolla siirtyvät kosteusvirrat ovat mahdollisia hyvin korkeissa raken-
nuksissa talvella ja katon tuulenvastaisissa kulmissa. Tällöin katonneliölle voi laskennal-
lisesti siirtyä raoista jopa yli 100 kg vettä. Höyrynsulun rei'istä voi siirtyä vuodessa kos-
teutta kymmeniä kiloja. Näin suurissa kosteuskuormissa ei PVC-katon kuivumiskyky

välttämättä riitä edes uratuuletetussa katossa. Höyrinsulun tiivistämättömät saumat eivät laskennallisesti päästä lähellekään yhtä suuria kosteusvirtoja lävitseen.

Taulukon 9 negatiiviset tulokset johtuvat lämmöneristettä kuivemman sisäilman virtauksesta lämmöneristeeseen. Konvektio voi kuivata rakennetta vuodessa jopa 6 - 30 kg neliölle. Käytännössä sisäilman konvektion kuivaava vaikutusta ei voi laskea katon kuivumiskyvyksi, sillä jo pieni sisäilman kosteuden nousu muuttaa kosteusvirran kastelevaksi. Sisäilman kosteudenhallinta on harvoin niin tarkkaa, että höyrinsulun ilmatii- viysvaatimuksesta voitaisiin tinkiä.

Tulokset eroavat esitetyistä jos lämmöneriste on hyvin kuiva ja sen suhteellinen kosteus on merkittävästi alle 68 %. Jos eristeen lämpötila on 15 °C taulukon 9 kosteusmäärät kasvavat rakennuksissa 1 - 4 vähintään kaksinkertaisiksi, ja rakennuksissa 5 - 6 määrät kasvavat 15 - 30 %.

5.5.3 Vesivuodot

Katevauriot johtavat veden siirtymiseen yläpohjarakenteeseen. PVC-katteilla vaurioita syntyy esimerkiksi pistokuormista. Katevauriosta johtuvat kosteuskuormat ovat usein suuria, ja siksi vaurioiden estäminen ja nopea korjaus on välttämätöntä PVC-katon toimivuuden varmistamiseksi. Kattojen liikennöinti voidaan toteuttaa silloilla, kuten kuvassa 17, tai moninkertaisilla kermeillä, jotta katevauriot voidaan minimoida.

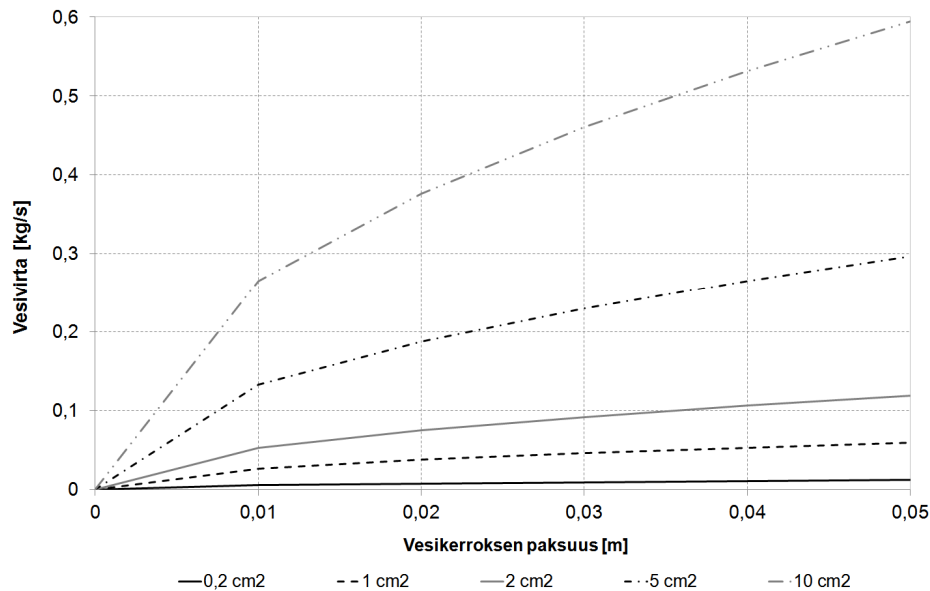


Kuva 17. Sateen aikana vesi lammikoituu katon jiiriin ja poistuu vasta minuuttien kuluttua sateen lakattua. Vaarallisin paikka vuotoaukolle on jiirissä. Taustalla näkyy katon kulkusilta.

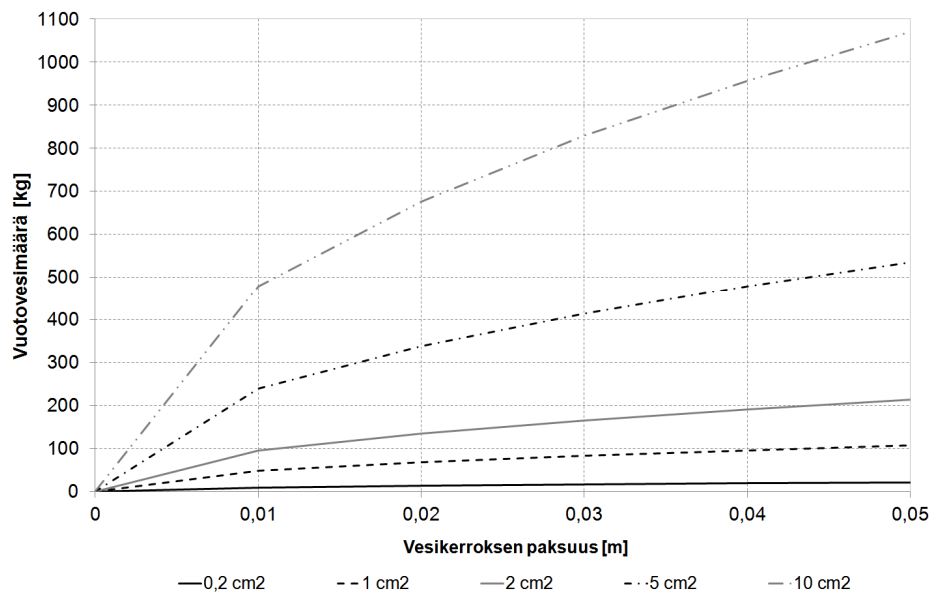
Vesivuodoilla kattoon siirtyvää kosteusmäärää voidaan arvioida aiemmin esitetyllä Dickin kaavalla. Kaava 15 voidaan esittää seuraavassa muodossa kun oletetaan, että siirtokerroin on 0,60 [19, s.454] ja veden tiheys on 1000 kg/m³:

$$q_{w.vuoto} = 2,657 * A * \sqrt{h} \quad (21)$$

missä h on hydrostaattisen paineen aiheuttavan kerroksen paksuus [m]. Siirtynyt vesimäärä saadaan vesivirran ja vuototilanteen keston tulona. 30 minuutin sateen aikana suurin siirtynyt vesimäärä laskentaoletuksilla on yli 1000 litraa. Pienimmällä käytetyllä vuotoaukon alalla $0,2 \text{ cm}^2$, joka vastaa esimerkiksi puukon viiltoa kermissä, siirtyvä vesimäärä on 10 - 20 kg. Vesimäärä voi nousta satoihin litroihin, mihin vaikuttaa eniten vuotoaukon pinta-ala. Vesikerroksen paksuuteen vaikuttaa kattokaivojen määrä ja kyky siirtää vettä suhteessa kattopintaan sekä puutteet kallistuksissa. Kuvaan 18 on piirretty vedenpaineella aiheutuva vesivirta ja kuvaan 19 siirtyvä vesimäärä 30 minuutin aikana eri vuotoaukon alalla ja vedenpaineella.



Kuva 18. Vedenpaineen aiheuttama vuotovesivirta laskettuna vuotoaukon ja veden kerrospaksuuden funktiona.



Kuva 19. Vedenpaineen aiheuttama vuotovesimäärä [kg] 30 minuutin aikana laskettuna vuotoaukon ja veden kerrospaksuuden funktiona.

Dickin kaava ei huomioi vuotoaukon alla olevan lämmöneristeen virtausvastusta. PVC-kermi on eristeen päällä suurelta osalta irrallaan, jolloin vesi pääsee virtaamaan katteen alle. Jos kermi olisi kauttaaltaan kiinni eristeessä, olisivat vuotovesimäärät huomattavasti laskettuja alemmat, sillä esimerkiksi kivivilla ei ime kosteutta kapillaarisesti. Katon jiirissä lammikoituva vesi painaa kermiä lämmöneristettä vasten, mikä vähentää virtausta merkittävästi verrattuna laskettuihin tuloksiin. Lasketut arvot ovatkin teoreettisia maksimiarvoja.

Lämmöneristeen vaikutusta arvioitiin yksinkertaisella kokeella, missä PVC-kermiin tehtiin $20 \times 1 \text{ mm}^2$ reikä ja vesikerroksen paksuus pidettiin noin 5 cm:ssä. Vuotomäärä oli 0,07 kg/min, kun se on Dickin kaavalla vastaavilla oletuksilla 0,7 kg/min. Käytännössä katevauriosta tapahtuva vuotomäärä on kokeen perusteella noin 10 kertaa pienempi, kun huomioidaan eristeen vaikutus virtaukseen.

5.5.4 Kosteuden kondensoituminen

Kosteuden kondensoitumisessa vesihöyry tiivistyy ja muuttuu vedeksi. Kondensoituminen tapahtuu, jos vesihöyry on yhteydessä pintaan, jonka lämpötila alittaa kastepistelämpötilan. Kondensoitumisen kriteerinä voidaan käyttää myös ilman vesihöyryn kylästyspainetta. Kondenssi tapahtuu lämpötilan määräämänä, sillä ilman kriittinen vesihöyrypitoisuus $[\text{g/m}^3]$ riippuu lämpötilasta $[\text{°C}]$ kaavan 22 mukaisesti [31, s.10].

$$v_{kr} = 4,85 + 3,47 * \frac{T}{10} + 0,945 * \left(\frac{T}{10}\right)^2 + 0,158 * \left(\frac{T}{10}\right)^3 + 0,0281 * \left(\frac{T}{10}\right)^4 \quad (22)$$

Kondensoitumisen lämpötilariippuvuuden vuoksi kondensoitumista voidaan paikallisesti estää erilaisilla rakenteiden lämmitysjärjestelmillä, esimerkiksi lämmitetyillä ikkunoilla. PVC-katoissa vesihöyryn kondensoitumista ilmenee lähinnä seuraavissa tilanteissa:

- Yön vastasäteily tai talvella kylmä ulkoilma aikaansaa kondenssin lämmöneristeen yläosassa.
- Kesällä auringonpaiste siirtää kosteutta alaspäin rakenteessa, jolloin kondenssi syntyy höyrynsulun päälle.
- Auringonsäteily siirtää kosteutta lämmöneristeen sisällä kylmemmälle alueelle.
- Uratuuletus tuo rakenteeseen kosteampaa ilmaa kuin rakenteen kyllästyskosteus.
- Ilmavuodot sisäilmasta kondensoivat lämmöneristeessä.

Kondensoitumisen haitallisuuden arvioinnissa on huomioitava tiivistyvän kosteuden lähde. Jos kondensoituminen johtuu kosteudesta, joka on jo rakenteessa, mutta kertyy tietyllä alueella, ei tämä lisää rakenteen sisältämää kosteus määrää (kolme ylintä kohtaa yllä olevassa luettelossa). Tällöin kyse on kosteuden sisäisestä liikkeestä rakenteessa, mikä ei välttämättä ole vaaraksi rakenteelle, mutta voi aiheuttaa valumia. Kompaktikaatoissa tällaista kondensoitumista tapahtuu usein. Jos taas kondensoituminen tapahtuu rakenteeseen virtaavan ilman seurauksena, voi rakenteen kosteus määrä lisääntyä. Ilmavirtaus voi olla tarkoituksellinen, esimerkiksi tuuletus, tai rakennevirheestä johtuva, esimerkiksi ilmavuoto.

Kondensoituminen on yleensä haitallinen ilmiö rakenteissa. Tiivistyessään vedeksi vesihöyry voi aiheuttaa rakennuksessa valumista pinnoilla tai lattialle. Suhteellisen kosteuden ollessa riittävän korkealla riittävän pitkän aikaa yli 0 °C lämpötilassa, on mikrobikasvu mahdollista. Kondensoitumista voidaan toisaalta käyttää hyväksi kuivattamaan rakenteita. Jos katon sisään lämmöneristekerrokseen asennetaan kylmä pinta, voidaan sillä kerätä kosteutta rakenteesta kondensoimalla vesihöyryä pintaan. [35, s.223 - 229] Menetelmä toimii tapauksissa, joissa halutaan poistaa rakennuskosteus katosta, jolla on heikko kuivumiskyky eikä kuivatusta voida toteuttaa rakennetta tuulettamalla.

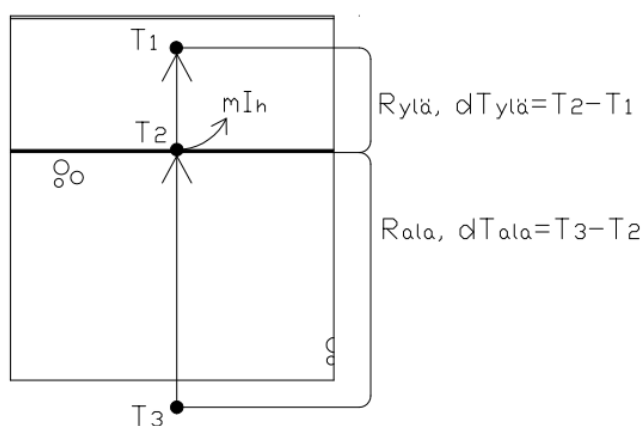
Vesihöyryn kondensoituminen lämmittää ja haihtuminen viilentää pintaa. Lämpövirta voidaan laskea kaavalla [4, s.45]:

$$q_{kond} = \dot{m} * I_h \quad (23)$$

missä q_{kond} on lämpövirta pinnalle [W/m^2], \dot{m} on massavirta [$\text{g}/\text{s}/\text{m}^2$] ja I_h on höyrystyslämpö (lämpötilassa 0°C) 2501 [J/g]. Massavirta \dot{m} voidaan ratkaista ajasta riippumattomalla tasetarkastelulla tietyn pisteen ja sen ympäristön välillä kaavalla 23.

$$\dot{m} = q_{\text{kond}}/I_h = \left(\frac{dT_{\text{ala}}}{R_{\text{ala}}} - \frac{dT_{\text{ylä}}}{R_{\text{ylä}}} \right) / I_h \quad (24)$$

Kaavalla 24 voidaan arvioida suuntaa antavasti kondensoitumista rakenteen lämpötilojen perusteella. Todellisuudessa lämpöä varastoituu materiaaleihin, jota kaava 24 ei huomioi. Kuvassa 20 on esitetty kaavan 24 mukainen tilanne PVC-katossa.



Kuva 20. Haihtumiseen massavirran laskenta lämpötaseen avulla.

Kondensoitumiseen liittyvä lämmönsiirtyminen ei ole ratkaiseva ilmiö rakenteen lämpö- tai kosteusteknisessä toimivuudessa, mutta sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi mitaustuloksien analysoinnissa.

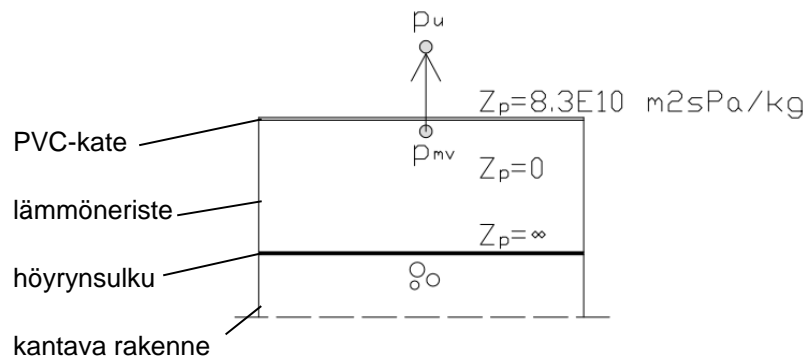
5.6 PVC-katon kuivumiskyky

5.6.1 Yleistä

PVC-katon kuivuminen tapahtuu pääasiassa diffuusiolla ja uratuuletuksella. Uratuuletuksessa katossa kuivuminen tapahtuu suurimmaksi osaksi konvektiolla, koska se on merkittävästi diffuusiota nopeampaa. Pumpausvaikutuksen merkitys on pieni. PVC-katon kuivumiskyvyssä ei ole tarkasteltu tilannetta, jossa sisäilma on alipaineinen kattoon nähden tai alaspäin avoimia rakenteita. PVC-katoissa on yleensä diffuusiitiivis höyrynsulku. Sisäilman alipaineella kattoon virtaisi ulkoilmaa ja katosta virtaisi ilmaa alaspäin rakennukseen. Rajausta perustuu oletukseen, että PVC-katteisen rakennukset ovat yleensä korkeita, luokkaa $10 - 30$ m, jolloin ilmavirtaus suuntautuu sisältä kattoon.

5.6.2 Diffuusio ulkoilmaan

Käsinlaskennalla voidaan suuntaa antavasti arvioida katon kuivumiskykyä. Laskennassa kuivuminen tapahtuu diffuusiolla kaavan 7 mukaan. Diffuusion oletetaan tapahtuvan vain ulkoilmaan, eli höyrynsulun vesihöyrynvastus oletetaan merkittävästi suuremmaksi kuin PVC-kermin. Kivivillan (esim. 230 mm) vaikutusta rakennuskosteuden diffuusiioon ei ole huomioitu, sillä sen vesihöyrynvastus on alle 2 % PVC-kermin (Protan SE 1.2) vesihöyrynvastuksesta. Vesihöyrynvastus Z_p voidaan laskea vesihöyrynläpäisevyydestä δ_v kaavoilla 8 ja 10. Kuvassa 21 on esitetty käsinlaskennan laskentaoletukset ja kosteuden diffuusio ulkoilmaan.



Kuva 21. Käsinlaskennassa oletetaan katon kuivuvan diffuusiolla ulkoilmaan.

Vesihöyryn osapaineena käytetään vakioarvoja, joista villan vesihöyryn osapaine on määritetty kenttätutkimuksessa saadun lämpötiladatan mukaan. Mineraalivillan yläpinnan keskimääräinen lämpötila laskennassa on 17 °C. Arvo määritettiin kesä-marraskuun mittaustuloksilla alueilta 1 - 5. Ulkoilman vesihöyryn osapaine määritettiin Helsinki-Vantaan säätietojen perusteella keskiarvona huhti-marraskuun arvoista [15, s.36 - 37], eikä se vaihtelee laskussa vuodenajan mukaan (kuva 13). Ulkoilman lämpötila oli 9,3 °C ja suhteellinen kosteus 77 %. Laskennassa ei huomioida hygroskooppisen kosteusmäärän ylittävää kosteutta. Laskennassa huomioidaan kuivumisen hidastuminen eristeen vesihöyryn osapaineen laskiessa. Taulukossa 10 on esitetty PVC-katon lämmöneristeen kuivumisaika 95 % suhteellisesta kosteudesta 75 % suhteelliseen kosteuteen.

Taulukko 10. PVC-katon kuivumislaskelma diffuusiolla ulkoilmaan.

ϕ [%]	w [kg/m³]	dw [kg/m³]	dG [kg/m²]	ϕ [%]	p_{mv} [Pa]	p_u [Pa]	$Z_{p,PVC}$ [m²sPa/kg]	g_{diff} [kg/m²s]	t [s]	t [kk]
95	0,83									
		0,15	0,03	93	1795	942	8,30E+10	1,03E-08	3,30E+06	1,3
90	0,68									
		0,12	0,03	88	1698	942	8,30E+10	9,10E-09	3,10E+06	1,2
85	0,56									
		0,1	0,02	83	1601	942	8,30E+10	7,93E-09	3,00E+06	1,1
80	0,46									
		0,08	0,02	78	1504	942	8,30E+10	6,77E-09	2,90E+06	1,1
75	0,37									
(kivivilla)		0,46								4,7

Taulukossa 11 on esitetty kuivumisaika vuosina riippuen vuosittaisesta kuivumiskuukausien määrästä. Kuivumiskuukausien määrä riippuu talven kestosta. Talvella lämmöneristeen yläosan lämpötila on alle 0 °C, joten kosteus on kiinteässä olomuodossa eikä pysty siirtymään diffuusiolla ulkoilmaan. Kuivuminen tapahtuu vuodessa, jos katossa ei ole rakennuskosteutta yli lämmöneristeen hygroskooppisen kosteudensitomiskyvyn. Kuitenkin yleensä katossa on rakennuskosteutta yli hygroskooppisen alueen.

Taulukko 11. PVC-katon hygroskooppisen kosteuden kuivumiseen kuluva aika käsinlaskennalla. Oikeinpuoleisimmassa sarakkeessa kuivumisaika, jos ulkoilman suhteellinen kosteus nousee 5 %.

kuivumiskuukausia vuodessa	kuivumisaika vuotta	kuivumisaika vuotta (+5%)
9	0,52	0,58
8	0,59	0,65
7	0,67	0,74
6	0,78	0,86
5	0,94	1,04

Katon kuivumisaika riippuu osaltaan ulkoilman vesihöyryn osapaineesta. Kuivumisaika nousee tässä tapauksessa 10 % kun ulkoilman suhteellinen kosteus nousee 5 prosenttiyksikköä.

Taulukon 11 kuivumiskuukausien määrä vähenee talven pidentyessä. Talvella katteen alapinnassa on jääkerros, joka vastustaa diffuusiota. Katto kuivuu niin pitkään kunnes katteen alapuolinen jääkerros muodostuu, sillä lämmöneristeen huokoset voivat jäätyä aina 60 %:sti, ennen kuin jäätyminen alentaa diffuusiota [36, s.22]. Katteen alapuolisen jääkerroksen ajallista kestoa voidaan arvioida lumitilastoilla. Ilmatieteenlaitoksen mukaan Suomessa lumipeite esiintyy lyhimmillään 9 vuorokautta vuodessa ja pisimmillään 229 vuorokautta. Keskimäärin lumipeite esiintyy Suomessa 3 - 7 kuukautta vuodessa paikkakunnasta riippuen [37]. Kuivumiskuukausia on tämän perusteella 5 - 9.

Rakennuskosteuden kuivumista voidaan arvioida seuraavasti. Katolle sataa vettä ennen lämmöneristeen asennusta 1,7 mm vettä eli 1,7 kg/m². Oletetaan, että tästä määrästä saadaan työnaikaisella kosteudenhallinnalla poistettua 80 %. Tällöin rakennuskosteutta on 0,35 kg/m². Kuivuvan kosteuden höyrynpaine taulukossa 13 on määritetty taulukon 12 mukaan. Höyrynpaineen laskennassa oletetaan, että jiirin kosteampi alue käsittää 5 % katon alasta. Vaikka katossa olisi rakennuskosteutta, suhteellinen kosteus ei ole PVC-kermin alapuolella kuin keskimäärin 80 % kesä-marraskuussa. Lämpötila eristeessä on sama 17 °C kuin hygroskooppisessa kuivumislaskelmassa.

Taulukko 12. Käsinlaskennassa käytetyn lämmöneristeen vesihöyrynpaineen laskenta perustui kenttätutkimuksen tuloksiin alueilta 1 ja 2 kesä-marraskuussa. Kenttätutkimus on esitetty kappaleessa 6.

alue1	ϕ [%]	T [°C]	%-osuus (arvio)
keskimäärin pisteessä 3A (keskellä katto)	80,2	16,7	0,95
keskimäärin pisteessä 1A (jiirissä)	91	15,3	0,05
keskimäärin alueella	80,7	16,7	
alue2	ϕ [%]	T [°C]	%-osuus (arvio)
keskimäärin pisteessä 6A (keskellä katto)	76,8	16,9	0,95
keskimäärin pisteessä 4A (jiirissä)	82	16,8	0,05
keskimäärin alueella	77	16,9	
alueet 1 ja 2	78,9	16,8	
laskenta-arvot RH [%], T [°C]:	80	17	→ $p_{mv}=1552$ Pa

Taulukossa 13 on laskettu rakennuskosteuden kuivumiseen kuluva ajaksi noin 18 kuukautta. $0,35 \text{ l/m}^2$ rakennuskosteus kuivuu noin 2 - 4 vuoden aikana riippuen talven kestosta. Rakennuskosteus lisää katon kuivumisaikaa moninkertaiseksi verrattuna hygroskooppisen kosteuden kuivumisaikaan. $0,35 \text{ l/m}^2$ suurempien rakennuskosteuksien kuivumisaika on arvioitavissa edellä lasketusta ajasta kertomalla kuivumisaika rakennuskosteuksien osamäärällä. Taulukossa 13 on laskettu lisäksi rakennuskosteuden kuivumisaika, jos ulkoilman suhteellinen kosteus nousee 5 prosenttiyksikköä. Tällöin kuivumisaika nousee 11 %. Taulukon 13 tuloksien perusteella rakennuskosteuden vuosittainen kuivuminen diffuusiolla on $0,230 \text{ kg/m}^2$, kun oletetaan kuivumisen tapahtuvan koko vuoden ajan.

Taulukko 13. Yksinkertaistettu rakennuskosteuden kuivumisen laskenta. Alemmalla rivillä kuivuminen laskettu ulkoilman 5 %-yksikköä korkeammalla suhteellisella kosteudella.

ϕ	w	dw	dG	ϕ	p_{mv}	p_u	$Z_{p,PVC}$	g_{diff}	t	t
[%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ²]	[%]	[Pa]	[Pa]	[m ² sPa/kg]	[kg/m ² s]	[s]	[kk]
80	-	-	0,35	80	1552	942	8,30E+10	7,35E-09	4,80E+07	18,4
80	-	-	0,35	80	1552	1005	8,30E+10	6,59E-09	5,30E+07	20,5

Kuivumisnopeus riippuu tarkastelupaikasta. Helsinki-Vantaan säätiedot edustavat Suomessa kuivumisen kannalta hidasta ulkoilmaa. Sodankylän sääolot ovat kuivimmat Suomessa, joten katto kuivuu nopeammin näissä olosuhteissa (kuva 13). Hygroskooppinen kosteus kuivuu niissä oloissa 34 % ja rakennuskosteus 39 % nopeammin kuin Helsinki-Vantaan sääoloissa (vastaavalla laskennalla kuin taulukossa 13). Esimerkiksi rakennuskosteus kuivuisi Sodankylässä 13,2 kuukaudessa (18,4/1,39). Pohjois-Suomessa kuivumisen arvioinnissa tulee huomioida, ettei katto kuivu pakkaskeleillä, vaikka ulkoilman vesihöyryn osapaine on alhainen. Käsinlaskennassa ei ole huomioitu katon käytönaikaisia kosteuskuormia, jotka voivat hidastaa kuivumista tai pahimmassa tapauksessa kastella lämmöneristekerrosta.

5.6.3 Kuivuminen uratuuletuksella

Konvektiolla tapahtuva rakenteen kuivuminen kaavan 12 mukaan soveltuu uratuuletetun PVC-katon tarkasteluun. Kosteudensiirtyminen metrin levyisellä kaistaleella kattoa [g/sm] voidaan laskea kaavalla 25.

$$g_{kuiv.urat} = (v_{kr.}(T_{ura}) - v_u)v_{ura}(t)A_{ura} \quad (25)$$

missä $v_{kr.}(T_{ura})$ on tuuletusuran lämpötilalla [°C] kaavalla 22 laskettu kriittinen vesihöyrymäärä [g/m³], v_u on ulkoilman absoluuttinen kosteussisältö [g/m³], $v_{ura}(t)$ on tuuletusuran ilman nopeus [m/s] ajanhetkellä t ja A_{ura} on tuuletusurien yhteenlaskettu pinta-ala metrin leveydellä [m²/m]. Teoriassa on mahdollista, että kaavan 25 mukaan tuuletusilma siirtää kattoon kosteutta, jos ulkoilman absoluuttinen kosteus on yli lämmöneristeen kriittisen absoluuttisen kosteus määrän. Tällaista tilannetta ei kuitenkaan havaittu tutkimukseen liittyvässä kenttätutkimuksessa. Kaava 25 voidaan muuttaa katoneliölle [g/sm²] kaavan 26 mukaisesti.

$$g_{kuiv.urat.m2} = \frac{g_{kuiv.urat}}{l_{KK}} \quad (26)$$

missä l_{KK} on kokoojakanavien välinen etäisyys [m]. Kuivumiskyvyssä oletetaan, että kattoon virtaava ilma lämpenee urassa lämpötilaan, joka vastaa katon lämpötilaa uran korkeudella. Liitteessä 1 on todettu, että uraan virtaava ilma lämpenee hyvin nopeasti tasapainolämpötilaansa. Oletus, että ilman kosteus tuuletusurassa nousee 100 %:iin, pätee hyvin kosteassa katossa, sillä kesällä katolle osuva auringonsäteily lämmittää lämmöneristeen, jolloin eriste luovuttaa huokosilmaan paljon kosteutta, mikä siirtyy alaspäin ja voi nostaa uran suhteellisen kosteuden 100 %:iin. Tätä ennen kosteus on kerääntynyt yöaikaan lämmöneristeen yläosiin yön vastasäteilyn ansiosta.

VTT on todennut kenttämittauksissa suuruudeltaan 0,01 - 0,1 m/s nopeuksia tuuletusurissa [16, s.29]. Tutkimuksessa ei tarkemmin ilmennyt mittausajankohta, mikä vaikuttaa nopeuksiin. SINTEF on maininnut ilman nopeudeksi urissa 0,03 - 0,3 m/s [12, s.4]. Tuuletusuran virtausnopeutena käytetään kappaleessa 6.3.2 ja 7.2.5 näiden lähteiden perusteella arvoa 0,05 m/s. Virtausnopeus tuuletusurissa ei ole vakio, vaan se vaihtelee vuorokaudenajan ja vuodenajan mukaan.

5.6.4 Pumppausvaikutus

Aurinkoisina kesäpäivinä lämmöneristeen yläpinnan lämpötila nousee lähelle 70 °C:ta, jolloin lämmöneristeen huokosilman tilavuus kasvaa. Kaasun tilavuus hetkellä i voidaan arvioida riittävällä tarkkuudella yleisellä tilanyhtälöllä:

$$V_i = \frac{nRT_i}{p_i} \quad (27)$$

missä V on kaasun tilavuus [m^3], n kaasun ainemäärä [mol], R on yleinen kaasuvakio [J/mol/K], T on lämpötila [K] ja p on kaasun paine [Pa]. Tarkastellaan ajanhetkiä 1 ja 2. Oletetaan, että paine on hetkellä 2 sama kuin mitä se oli hetkellä 1. Tilavuuden muutos saadaan kaavalla 28.

$$\Delta V = \frac{nRT_2}{p_1} - \frac{nRT_1}{p_1} = \frac{nR}{p_1} (T_2 - T_1) = \frac{V_1}{T_1} (T_2 - T_1) \quad (28)$$

Taulukossa 14 on esitetty kuivan ilman laajeneminen suhteessa alkuperäiseen tilavuuteen. Lämmöneristeen lämpötilan ollessa 65°C alkuperäinen tilavuus 20°C lämpötilassa kasvaa 15 %. Vastaavasti ilman viiletessä sen tilavuus pienenee taulukon 14 mukaisesti, mikä johtaa niin sanottuun pumppausilmiöön.

Taulukko 14. Ilman laajeneminen suhteessa alkuperäiseen tilavuuteen ilman lämpötilan noustessa. Muokattu lähteestä [14, s.57].

Lämpötila T [K]	Lämpötila T [°C]	Tilavuuden muutos dV [-]
293	20	0
303	30	0,034
313	40	0,068
323	50	0,102
333	60	0,137
343	70	0,171

Pumppausvaikutuksen arvioinnissa taulukon 14 mukaan on huomioitava, että lämmöneristeen lämpötila muuttuu kesäpäivinä eristeen yläosissa merkittävästi enemmän kuin eristeen alaosissa.

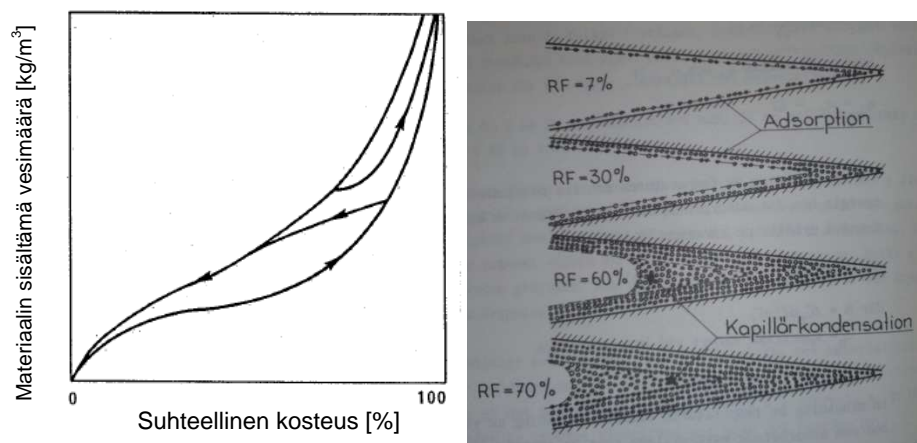
5.7 Rakennusmateriaalien hygroskooppisuus

Hygroskooppisuudella tarkoitetaan ilmiötä, missä materiaali sitoo fysikaalisesti kosteutta ilmasta. Hygroskooppisuuden huomioiminen on tärkeää katon kosteusteknisen toiminnan arvioinnissa. Materiaalin hygroskooppisen kosteudensitomiskyky perustuu adsorptioon ja kapillaarikondenssiin [19, s.246]. Adsorptiossa kosteus sitoutuu van der Waalsin voimien vaikutuksesta yksi- tai monikerroksisena materiaalin huokosten pinnalle. Kun vesihöyryä on sitoutunut huokosten pinnalle tarpeeksi, seuraa kapillaarikondenssi. Kapillaarikondenssissa vesihöyry kondensoituu huokosrakenteen kaareville pinnoille, eli meniskuksille, alle 100 % suhteellisessa kosteudessa. Kapillaarikondenssi on

adsorptiota merkittävämpi kosteudensitoutumismekanismi. Hygroskooppinen kosteusalue on välillä 0 - 98 % suhteellinen kosteus.

Materiaali saavuttaa hygroskooppisen tasapainotilan tietyn ajan kuluttua ympäröivän ilman tai viereisen materiaalin suhteellisen kosteuden muutoksesta. Tasapainokosteus, kg/m^3 , kuvataan tasapainokosteuskäyrällä. Käyrää kutsutaan myös sorptiokäyräksi ja sorptioisotermiksi. Tasapainokosteuskäyrältä voidaan erottaa alueet missä yksikerroksinen ja monikerroksinen adsorptio sekä kapillaarikondenssi tapahtuvat. Materiaalin kasvuessa alussa vallitseva ilmiö on yksikerroksinen adsorptio ja tarpeeksi suurella suhteellisella kosteudella monikerroksinen adsorptio. Korkeilla suhteellisilla kosteuksilla kapillaarikondenssi (kuva 22) on mahdollinen, mikä nostaa hygroskooppista kosteusmäärää merkittävästi. Tasapainokosteuskäyrältä voidaan katsoa materiaalissa oleva kosteusmäärä tietyssä suhteellisessa kosteudessa tai materiaalin suhteellinen kosteus, kun tiedetään materiaalin sisältämä kosteusmäärä.

Materiaaleilla on erilainen kastumis- ja kuivumiskäyrä. Tämä johtuu hystereesi-ilmiöstä, missä desorptiossa huokosiin jää enemmän kosteutta kuin absorptiossa. Hystereesi-ilmiöön on monia syitä. Esimerkiksi kuivumisprosessissa kosteus sitoutuu huokosiin, joiden huokoskoko on niin iso, ettei kapillaarikondenssi ole mahdollista niissä [19, s.250]. Tilanteessa, jossa kuivuva materiaali alkaa kastua, tapahtuu siirtyminen desorptiokäyrältä absorptiokäyrälle. Tällöin materiaalin tasapainokosteuskäyrä noudattaa ns. scanning-käyrää, joka yhdistää absorptio- ja desorptiokäyrät (kuva 20). Eräässä tutkimuksessa kuitenkin mitattiin scanning-käyriä, ja monessa tapauksessa ne jäivät absorptio- ja desorptiokäyrän ulkopuolelle [38, s.650]. Syy tähän jäi epäselväksi. Kosteustekniikassa laskelmissa ei yleensä huomioida tasapainokosteuskäyrän hystereesi-ilmiötä, vaan tasapainokosteuskäyränä käytetään absorptio- ja desorptiokäyrien välistä keskimääräistä tasapainokosteuskäyrää.



Kuva 22. Vasen kuva: Absorptio- ja desorptiokäyrät sekä niiden väliset scanning-käyrät [39, s.46]. Oikea kuva: Kapillaarikondensaatiossa materiaalin sitoma kosteusmäärä nousee merkittävästi [39, s.34]. RF = suhteellinen kosteus, adsorption = adsorptio ja kapillärkondensation = kapillaarikondenssi.

Tasapainokosteuskäyrä oletetaan usein riippumattomaksi lämpötilasta. Tämä pätee epäorgaanisiin materiaaleihin, mutta orgaanisilla materiaaleilla on selvä lämpötilariippuvuus ja lämpötilan laskiessa hygroskooppisesti sitoutuva kosteus määrä kasvaa. Lämpötila ei vaikuta kapillaarisesti sitoutuvaan kosteus määrään. [39, s.65 - 66] Hygroskooppisuuden riippuvuus lämpötilasta voi olla merkittävä, jos rakenteen lämpötila eroaa merkittävästi rakenteiden yleisistä lämpötiloista. PVC-katoissa lämmöneristeen yläosan lämpötila nousee auringonpaisteessa yli 60 °C:een, jolloin lämmöneristeen kosteudensitomiskyky on hyvin pieni.

Adsorboituva kosteus määrä riippuu materiaalin ominaispinta-alasta, joka on pieni-huukoisilla materiaaleilla suuri [19, s.34]. Tällaisia materiaaleja on esimerkiksi puu ja betoni. Pienet huokokset mahdollistavat kapillaarikondensaation alhaisimmilla suhteellisilla kosteuksilla [19, s.248]. Vähän kosteutta sitovia materiaaleja ovat puolestaan lämmöneristeet, joissa suurin osa tilavuudesta on ilmaa tai muuta kaasua. Puu ja betoni sitovat noin 100 - 150 kertaa enemmän kosteutta hygroskooppisesti kuin lämmöneristeet.

Materiaalien hygroskooppisuus vaikuttaa rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Jos hygroskooppinen kosteudensitomiskyky ylitetään, niin kosteus tiivistyy rakenteessa kylmään pintaan. Tiivistyminen voi myös tapahtua paksun materiaalikerroksen sisällä aluekondenssina [19, s.404 & 40, s.116]. Kosteudensitoutuminen materiaaliin tapahtuu tietyllä nopeudella, joten joissain tilanteissa vesihöyry saattaa kondensoitua, vaikka materiaalin hygroskooppinen kosteudensitomiskyky ei ole ylitetty. Tällöin tiivistyminen poistuu lopulta, kun materiaali vähitellen sitoo vesihöyryn huokosilmasta.

Erilaiset pinnoitteet voivat estää kosteuden siirtymisen hygroskooppisen materiaalin ja ympäristön välillä. Esimerkiksi puu sitoo kosteutta suuria määriä, mutta lakattu puu sitoo kosteutta huomattavasti hitaammin. Myös tilapäisillä ratkaisuilla kuten pressuilla voidaan estää materiaalin kastuminen kosteasta ilmasta. Kosteuden sitoutumisnopeus riippuu myös itse hygroskooppisen materiaalin vesihöyrynläpäisevyydestä. Esimerkiksi kevytbetonin kosteudenläpäisevyys on jopa kymmenkertainen normaalitiheyksiseen betoniin verrattuna, vaikka materiaaleihin hygroskooppisesti sitoutuva kosteus määrä on samaa suuruusluokkaa.

Tasapainokosteuskäyrä on yksi materiaaliominaisuuksista, jota tarvitaan ajasta riippuvassa lämpö- ja kosteusteknisessä laskennassa. Esitettyjen seikkojen vuoksi tasapainokosteuskäyrä on monimutkainen materiaaliominaisuus ja aiheuttaa laskentaan epävarmuustekijän. Tasapainokosteuskäyrän lämpötilariippuvuus ja hystereesi-ilmiö lienevät kuitenkin merkittäviä vain lyhyen aikavälin tarkasteluissa, kuten minuutti tai tunti tarkkuuden laskennoissa.

5.8 PVC-katon materiaalien kosteustekninen toiminta

5.8.1 Polyvinyylikloridikate

PVC-kate on yksikerroskate. Se koostuu pehmenneystä PVC-massasta ja tukikerroksesta. Tukikerros voi olla lasikuitua tai polyesterikangasta. Kate kiinnitetään mekaanisesti kantavaan rakenteeseen ja katteen saumat kuumailmahitsataan. Kuumailmahitsaus

on tärkein työvaihe PVC-katon vesitiiviyyden kannalta, joten sen laatuun on kiinnitettävä aina suurta huomiota. Yksikerroskatteet ovat herkkiä mekaanisille vaurioille, mistä syystä alustan on oltava tasainen ja jäykkä [15, s.68].

PVC-katteet ovat säänkestäviä ja pitkäikäisiä. PVC-kate on paloturvallinen, sillä se on itsestään sammuvaa ja sillä on alhainen palokuorma. PVC-katteet kuuluvat Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 edellyttämään luokkaan B_{ROOF(t2)}, sillä poikkeuksella, että EPS:n ja XPS:n päällä on käytettävä erotuskerroksena lasikuitumattoa. Katteen materiaalista noin 43 % on peräisin uusiutumattomista luonnonvaroista. [7]

Suomessa käytetään pääasiassa kolmea PVC-katemateriaalimerkkiä (tilanne vuonna 2011): Protan, Sika ja Alkorplan. Taulukossa 15 on esitetty PVC-katteiden kosteuden siirtymiseen liittyvien parametrien arvoja. Lasikuituvahvistetun 1,5 - 2,0 mm PVC-katteen S_d-arvo on 20 - 28 m [20]. Katteen kosteuskapasiteetti on olematon.

Taulukko 15. PVC-katteiden vesihöyrynvastuskerroin, vesihöyrynvastus, S_d-arvo ja vesihöyrynläpäisevyys. Ominaisuudet eivät eroa merkittävästi eri merkkien välillä. Alleviivattu arvo on valmistajan antama ja muut laskettuja. Saatavilla on myös paksumpia kermejä. Kumibitumikerman S_d-arvo on 99 - 150 m[20].

materiaali	vesihöyryn dif- fuusiovastuskerroin μ	vesihöyrynvastus Z_p	S _d -arvo S_d	vesihöyrynläpäisevyys δ_p
	[-]	[m ² sPa/kg]	[m]	[kg/msPa]
Protan SE1.2	13632	<u>8,3E+10</u>	<u>16</u>	1,4E-14
Protan SE1.5	13632	<u>1,1E+11</u>	<u>22</u>	1,4E-14
Renolit Alkorplan 1.2	<u>15000</u>	9,1E+10	18	1,3E-14
Renolit Alkorplan 1.5	<u>15000</u>	1,1E+11	22,5	1,3E-14
Sikaplan vgw12	<u>15000</u>	9,1E+10	18	1,3E-14
Sikaplan vgw15	<u>15000</u>	1,1E+11	22,5	1,3E-14

PVC-katteiden vuonna 2011 suunnitellut käyttöluokat on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Muovisten ja kumisten katteiden käyttöluokat [41].

Käyttöluokka	Paksuus [mm]	Käyttökohde
PVC1	1,2	Katoilla joiden kaltevuus vähintään 1:40
PVC2	1,5	Jiirialueilla joiden kaltevuus vähintään 1:60

Käyttöluokilla ohjataan kermien paksuuden suunnittelua siten, että riskialttiimmilla katon alueilla käytetään paksumpaa PVC-kermiä. Katteen minimipaksuus on 1,2 mm [15, s.68].

5.8.2 Lämmöneristeet

PVC-katoissa lämmöneristeiden tulee olla kosteudenkestäviä, sillä rakenteisiin pääsee aina enemmän tai vähemmän rakennuskosteutta, joka ei aina kuivu rakenteesta nopeasti. Hygroskooppisuudeltaan eristeet ovat vähän vettä sitovia, johtuen huokosten suuresta

koosta. Vesihöyrynläpäisevyydessä materiaaleilla on eroja. Lämmöneristeen kosteustekniset ominaisuudet on huomioitava arvioitaessa PVC-katon kuivumisnopeuden riittävyyttä katon eri tuuletusratkaisuilla.

Vanhoissa kivivilloissa pitkäaikainen kosteusrasitus saattoi aiheuttaa kuitujen sidoksien hajoamisen. Tällöin tiivis villa saattoi turvota ja pehmetä. Nykyään kivivillaeriste on kosteudenkestävämpää ja kestää korkeita suhteellisia kosteuksia pitkään, sillä villoissa käytetään kosteudelta suojaavia aineita. Kivivilla kestää lähes 100 % suhteellista kosteutta [42]. Normaaliolosuhteissa kivivillan kosteuspitoisuus on alle 0,5 paino-%, eikä se ime kosteutta [42]. Kuvassa 23 on esitetty testi, jossa kivivillaan leikattu ura on täytetty vedellä. Vesi ei imeydy villaan edes avoimista leikkauspinnoista. Vesi muodostaa kaarevia pintoja, jotka viittaavat villan hydrofobisuuteen eli se hylkii vettä. Villan vaurioituminen saattaa olla mahdollista, mikäli kosteutta on eristeessä yli hygroskooppisen määrän hyvin pitkiä aikoja.



Kuva 23. Kivivillan hydrofobisuus saadaan aikaan lisäaineilla. Kuvassa villaan leikattu ura on täytetty vedellä. Vesi ei imeydy villaan ja muodostaa kaarevat pinnat villaa vastaan.

Mikrobikasvun kehittyminen kivivillassa on vähäistä korkeissakin suhteellisissa kosteuksissa [43, s.15]. Homeisuusaste irrallaan olevassa eristepalassa jää noin 0,2:een vuoden aikana olosuhteissa 98 - 100 % ja 20 °C, kun homeisuusaste 1 vastaa ensimmäisiä havaintoja homeesta. Alemmissa kosteuksissa homeisuusaste on 0 puhtailla näytteillä. Eristeiden homehtumattomuus edellyttääkin, ettei eristeessä ole pinnalla orgaanista puupurua tai pölyä. Tutkimuksessa todettiin, että kerrokselliset rakenteet, siis myös PVC-katto, homehtuvat hitaammin kuin yksinään olevat materiaalit. Tulos pätee vain katoissa, joissa ei ole kantavan betonirakenteen päällä höyrynsulkua, kuten pakkasvarastoissa. Höyrynsulullisissa PVC-katoissa betonin emäksisyys ei vaikuta lämmöneristeseen, jolloin tulokset eivät välttämättä ole verrattavissa.

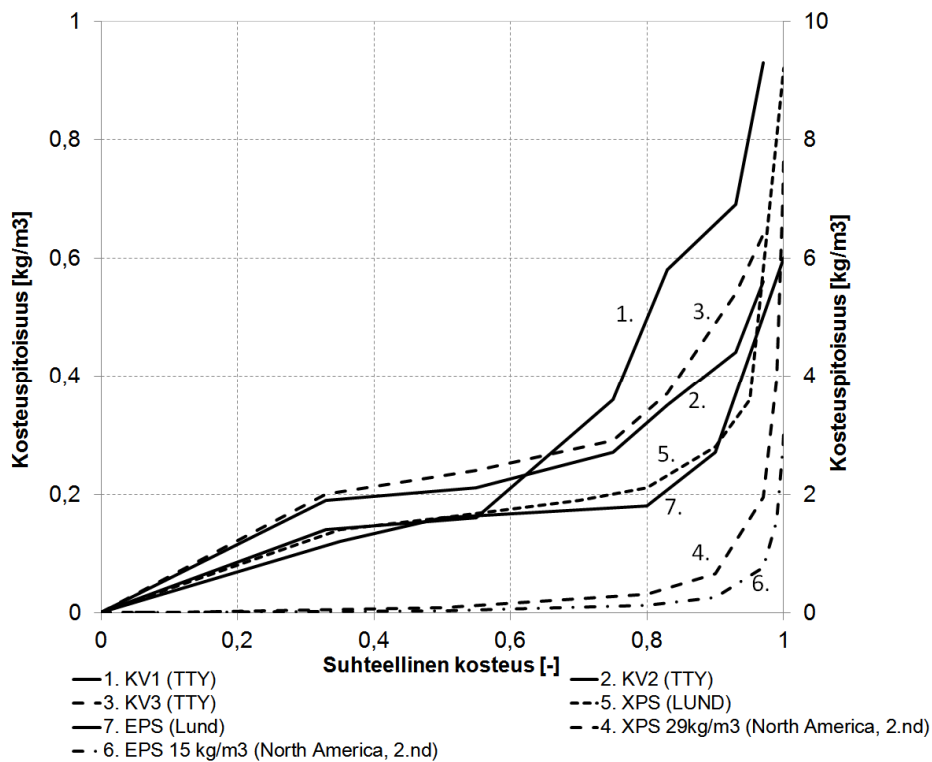
Vähäinen mikrobikasvu kattorakenteissa ei yleensä ole vaarallista, sillä katto on yleensä ylipaineinen sisäilmaan nähden. Mitä pienempi ja matalampi rakennus, niin sitä todennäköisemmin katon painesuhde voi olla toisinpäin. Tällöin on varmistettava, ettei sisäilmaan kulkeudu haitallisia kaasuja tai hiukkasia, mutta ennen kaikkea on varmistettava katon riittävän nopea kuivuminen.

Umpikattojen lämpöolosuhteet vähentävät osaltaan mikrobien kasvuedellytyksiä eristeessä. Yleisesti ottaen homeen kasvu edellyttää yli 0 °C lämpötilaa ja yli 75 % suhteellista kosteutta. Talvella, jolloin katossa on eniten tiivistynyttä kosteutta ja yläosien suhteellinen kosteus on 90 - 100 %, on myös katon yläosan lämpötila usein alle 0 °C. Toi-

saalta lämpimämmässä eristeen alaosassa suhteellinen kosteus on talvella alhainen, luokkaa 40 - 60 %. Kuivassa PVC-katossa ei kesäisin ole korkeaa suhteellista kosteutta, mutta rakennuskosteuden kuivumisvaiheessa suhteellinen kosteus voi olla hyvin korkea (80 - 100 %) kesälläkin.

PVC-katossa ei saa käyttää puupohjaisia materiaaleja eikä kattoon saa jättää esimerkiksi asennusaikana käytettyjä puumateriaaleja.

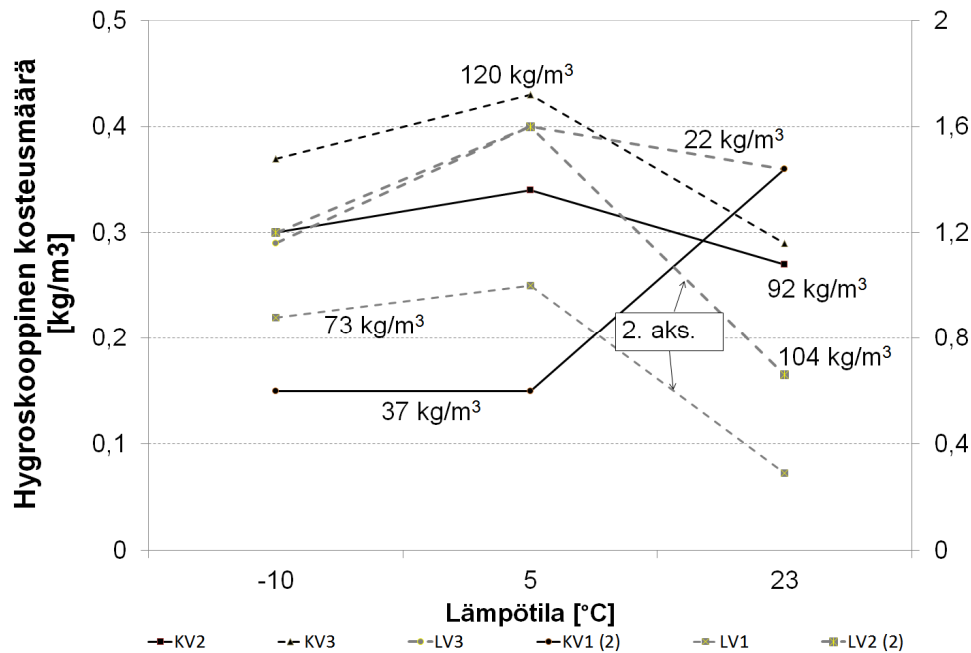
Kuvassa 24 on esitetty PVC-katoissa käytettyjen lämmöneristeiden tasapainokosteuskäyriä adsorptiotilanteessa. Näiden eristeiden hygroskooppinen kosteuskapasiteetti on yleensä alle 1 kg/m^3 . Myös suurempia sorptiokäyriä on esitetty aina noin 8 kg/m^3 asti. Eristeiden kosteuskapasiteetti on alhainen verrattuna betoniin tai puuhun, mikä vaikuttaa muun muassa katon rakennuskosteuteen. Suuruusluokaltaan yli kilon menevissä tasapainokosteuskäyrissä on huomioitu suhteellisen kosteuden hyvin korkeat arvot, 98 - 100 %, jolloin kosteutta sitoutuu materiaaliin kapillaarisesti. Kapillaarisella kosteuskapasiteetilla voidaan huomioda kosteusteknisissä laskelmissa kosteuden tiivistyminen ja kertyminen rakenteeseen.



Kuva 24. Lämmöneristeiden sorptiokäyrät adsorptiotilanteessa 23 °C lämpötilassa. Oikealla pystyakselilla korkeampia ilmoitettuja sorptiokäyriä solumuoveille 4 ja 6. [25], [24]

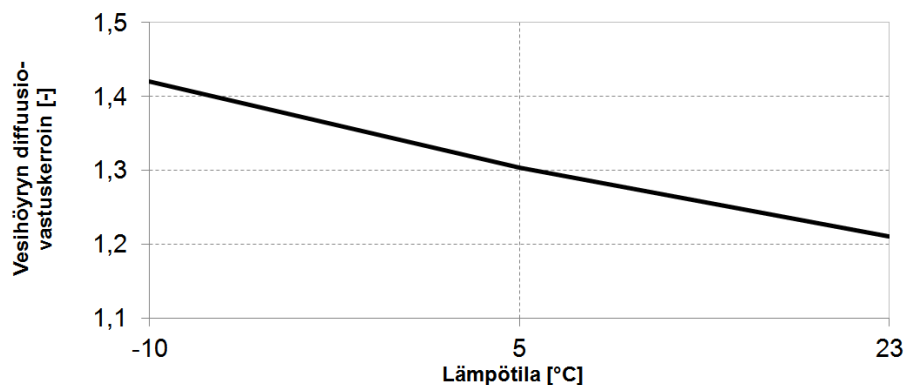
Kuvassa 25 on esitetty 75 % suhteellisessa kosteudessa määritettyjä hygroskooppisia kosteussisältöjä adsorptiotilanteessa lämpötilan funktiona [24, s.61]. Hygroskooppinen kosteusmäärä alenee useimmilla eristeillä lämpötilan kasvaessa, mutta yhdellä kivivilalla kosteusmäärä kasvoi lämpötilan kasvaessa. Tasapainokosteuksien mittauksia on

tehty aina 40 °C lämpötilaan asti [38]. PVC-katossa eristeen yläosat ovat jopa 60 °C lämpötilassa, mistä ei ole tehty tasapainokosteuksien mittauksia, sillä ne ovat rakennuksissa niin harvinaisia tilanteita.



Kuva 25. Eräiden eristemateriaalien hygroskooppisesti sitoman kosteuden lämpötilariippuvuus 75 % suhteellisessa kosteudessa [24, s.61]. Yhteensä 15:sta materiaalista yhdellä kivivillalla havaittiin selvä kasvava tasapainokosteus lämpötilan kasvaessa. Kuvassa LV = lasivilla ja KV = kivivilla.

Kivivillan kosteudenläpäisevyys on suuri, lähes ilman luokkaa. Kuvassa 24 on esitetty kivivillan vesihöyryn diffuusiovastuskertoimen lämpötilariippuvuus [24, s.80 - 81]. Diffuusiovastuskertoimen lämpötilariippuvuus ei vaikuta rakenteen kostustekniseen toimintaan ratkaisevasti. Tulokset ovat tutkimuksesta, jossa todettiin, että kyseisen kivivillan diffuusiovastuskerroin ei riipu suhteellisesta kosteudesta.



Kuva 26. Kivivillan vesihöyryn diffuusio-kerroin lämpötilan funktiona [24].

Taulukossa 17 on esitetty PVC-katoissa käytettyjen lämmöneristeiden vesihöyryn diffuusiovastuskertoimia.

Taulukko 17. Solumuovisten lämmöneristeiden diffuusiovastuskerroin on selvästi kivivillaa suurempi.

Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Diffuusiovastuskerroin μ [-]	Lähde
EPS	10 - 50	60	[44]
	15	27 - 38	[20]
XPS	20 - 65	150	[44]
	25 - 55	198 - 111	[20]
Kivivilla	37	1 - 1,5	[24]

Solumuovilla eristettyjen PVC-kattojen kosteuspitoisuuden muutokset ovat huomattavasti hitaampia kuin kivivillaisissa katoissa.

5.8.3 Höyrynsulku

PVC-katoissa käytetään höyrynsulkuina esimerkiksi bitumikermejä, höyrynsulku-muoveja ja höyrynsulkulaminaatteja. PVC-katot on useimmiten toteutettu suljettuna rakenteena, eli rakenteessa on kaksi tiivistä pintaa, joiden välissä lämmöneriste on. Tällöin höyrynsulun vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen katteeseen verrattuna [15, s.56]. Tämä toteutuu yleensä automaattisesti, sillä PVC-katteiden vesihöyrynvastus on alhainen suhteessa käytettyihin höyrynsulkuihin. Höyrynsulun valinnasta ohjeistetaan taulukossa, jossa huomioidaan sisäilman suhteellinen kosteus talviaikaan [15, s.53]. Taulukossa 18 on esitetty mahdollisia höyrynsulkuja.

Taulukko 18. Höyrynsulkumateriaalien vesihöyrynvastukset. Vertailuarvona on esitetty PVC-katteen vesihöyrynvastus.

Höyrynsulkumateriaali	Vesihöyrynvastus Z_p [m ² sPa/kg] *10 ⁹	Vesihöyrynvastuskerroin μ
PE-kalvo	500	492736
Bitumikermi TL4	500	32849
Bitumikermi TL 2	1600	105117
Euratex-Al	2500	985473
Bitumikermi TL4+Al 0,08mm	10000	656982
(PVC-kate)	n.100	n.13000-15000

PVC-kattojen höyrynsulun on oltava myös ilmatiivis, jotta rakenteeseen ei siirry kosteutta ilmapirtausten mukana. Yleensä höyrynsulun saumojen ja läpivientien kautta siirtyy kosteutta diffuusiota enemmän. Taulukon 18 höyrynsuluista saumojen tiivistykset on vaikeinta toteuttaa PE-kalvolla ja Euratex-AL:llä. Puuttellisista saumoista siirtyy kosteutta kattoon savupiippuvaikutuksen ja tuulen aikaansaamalla ylipaineella sekä pumpausvaikutuksella. Uratuuletus voi voimistaa ilmapirtausta kattoon.



Kuva 27. Euratex-AL -höyrynsulkulaminaatti. Kuvassa materiaalia on leikattu, mistä rosoinen reuna johtuu.

Rakennuksen käyttötarkoitus vaikuttaa höyrynsulun suunnitteluun. Jos sisäilma on kylmää, höyrynsulun tulee sijaita lämmöneristeen ulkopuolella [4, s.115]. PVC-kattojen tapauksessa tulee kate valita tiiviimmäksi (paksumpi kate tai muulla tavalla tiiviimpi kate) tai lisätä lämmöneristeen ulkopuolelle erillinen höyrynsulku. Jälkimmäinen vaihtoehto on PVC-katoissa todennäköisempi, sillä paksujenkin katteiden vesihöyrynvastukset ovat alhaisia verrattuna lämmöneristeen alapuoliseen rakenteeseen. Katteen alle voidaan laittaa esimerkiksi polyeteenikerros [5, s. 16].

Kylmissä rakennuksissa höyrynsulkua ei tarvita kantavan rakenteen päällä. Kosteus siirtyy rakenteessa alaspäin kohti sisäilmaa, ja tiivis höyrynsulku lämmöneristeen sisäpuolella estäisi kosteuden liikkeen keräten kosteutta kantavan rakenteen päälle. Tavallisesti rakenteen tulee harveta ulospäin vesihöyrynvastukseltaan, mutta kylmässä rakennuksessa harvenemisen tulee tapahtua sisätilaan päin.

6 Kenttätutkimus

6.1 Tutkimusohjelma

6.1.1 Yleistä

Kenttätutkimuksen tavoite oli selvittää PVC-katon lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa ja erityisesti katon kuivumiskykyä. Tutkimus suoritettiin Sipoossa sijaitsevan logistiikkakeskuksen katolla. Logistiikkakeskuksen toiminta on pitkälle automatisoitu ja keskuksen sisätilat ovat täynnä jopa 20 metriä korkeita hyllyjä. Rakennus on esitetty kuvassa 28. Tutkimusalueet sijaitsivat rakennuksen lounaisosassa alemmalla kattotasolla rakennuksen kyljessä ja yksi alueista sijaitsi ilmanvaihtokonehuoneen katolla. Ilmanvaihtokonehuoneet sijaitsivat alemmalla kattotasolla koko rakennuksen pituudella. Rakennuksen katemateriaali on kauttaaltaan 1,2 mm tummanharmaa PVC-kate.



Kuva 28. Näkymä koillisesta logistiikkakeskukselle. Tutkimusalue sijaitsi rakennuksen lounaisosassa (nuolen kohdalla). Tutkimusaluetta vastaava alue on korostettu punaisella viivalla. © Parvainen Arkkitehdit.

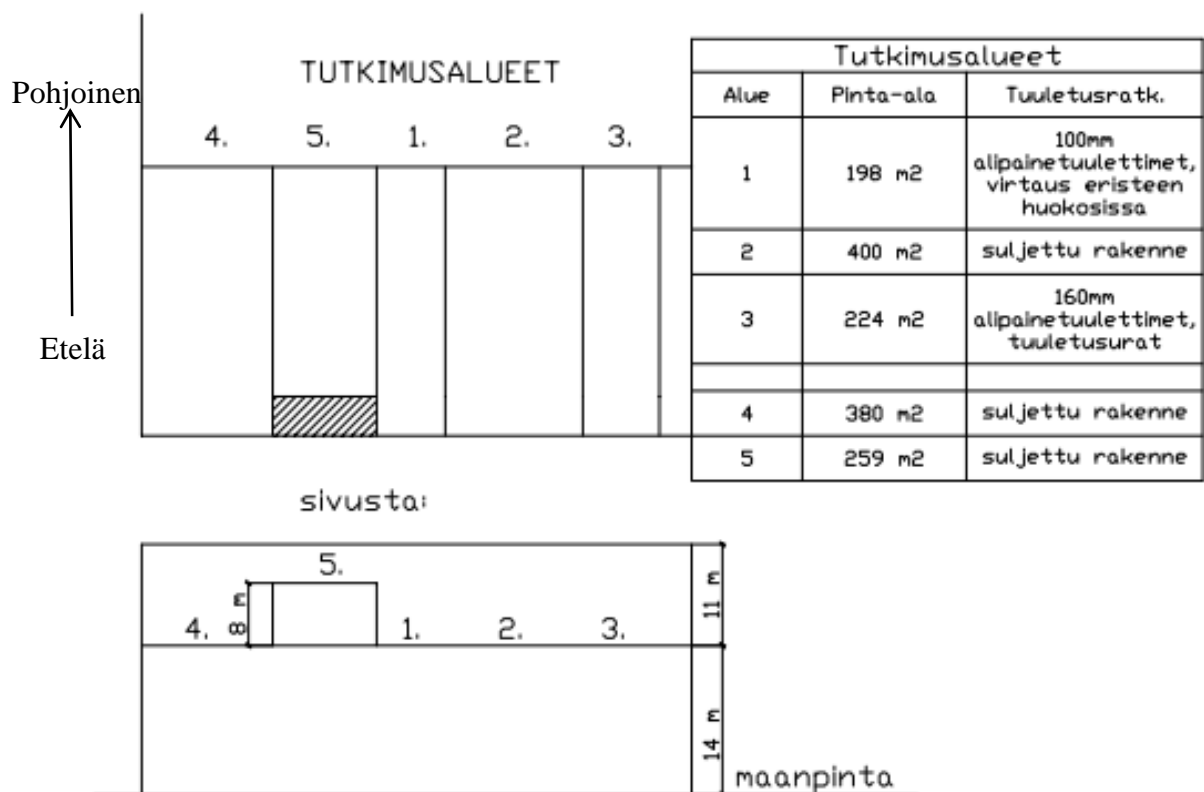
Kenttätutkimuksesta mitattiin jatkuvana mittauksena lämpötilaa ja suhteellista kosteutta PVC-katosta 10 minuutin välein ajanjaksolla 17.6–28.12.2011. Lisäksi mitattiin ulko- ja sisäilman vastaavia olosuhteita. Lämmöneristeet ja kate asennettiin huhtikuussa 2011 katon rakentamisen viimeisenä työvaiheena. Mitattu data edustaa kosteusteknisesti jo jossain määrin tasaantunutta kattoa. Rakennus ei ollut käytössä tutkimuksen aikana, ja sisäilman lämpötila oli lämmityskaudella keskimäärin 15 °C. Tutkimuksen aikana ulko-vaippa oli valmis, ja suurimman osaa tutkimusajasta ilmanvaihto ei ollut päällä.

Mittaukset aloitettiin anturien kalibroinnin jälkeen. Alueiden 1 ja 3 tuuletus avattiin 7.7.2011. Tutkimusohjelmaan kuului myös mahdollisuus lisätä tutkimusalueille vettä ja alueille rakennettiin sitä varten kastelujärjestelmät, joista on esimerkki kuvassa 10. Kastelukoe tehdään keväällä 2012, ja se ei kuulu tähän tutkimukseen. Mittauksia tullaan jatkamaan tarpeen mukaan vuonna 2012, jotta PVC-katon toiminnasta saadaan pidemmän aikavälin tuloksia.

6.1.2 Tutkimusjärjestelyt

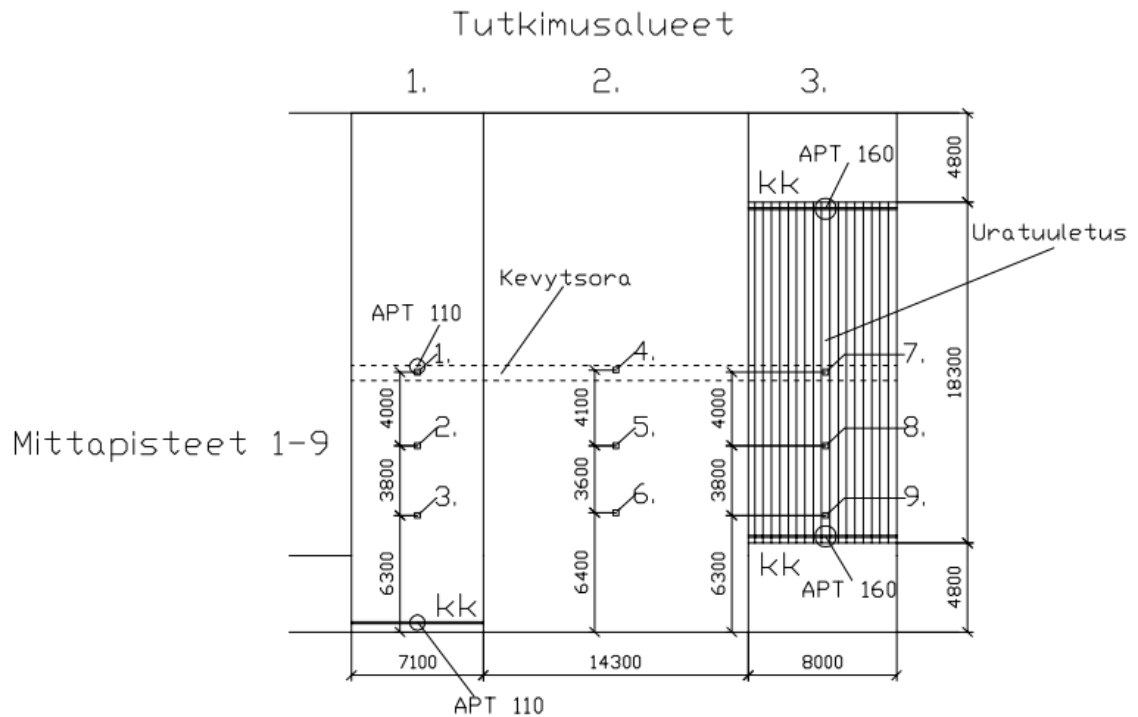
Tutkimuksessa mitattiin kattoon asennetuista muoviputkista, kuvat 39 ja 40, lämpötilaa ja suhteellista kosteutta Vaisalan HMP44-mittapäillä. Anturit oli kalibroitu ennen mittausta suhteellisissa kosteuksissa 11 %, 75 % ja 97 %. Anturien mittaustarkkuus on ± 2 - 3 % alueella 0 - 100 % ja $\pm 0,4$ °C alueella -20...60 °C. Tuulen nopeutta ja suuntaa mitattiin yhteensä 37 päivänä Vaisalan WA15-mittauslaitteistolla, jolloin voitiin arvioida tutkimuspaikan mikroilmaston tuulennopeutta. Nopeusanturin tarkkuus on $\pm 0,17$ m/s ja suunta-anturin $\pm 3^\circ$. Ulkoilman olosuhteet mitattiin vastaavalla anturilla, kuin mitä käytettiin rakennemittauksissa. Sisäilman olosuhteet mitattiin erillisillä Teston 174H-loggereilla, joita käytettiin tehdaskalibroinneilla. Toinen Testo-loggeri oli aleiden 1 - 3 alapuolella 1 m päässä laatan alla ja toinen ilmanvaihtokonehuoneessa alueen 5 alapuolella metrin korkeudella lattiasta. Anturien tarkkuus on ± 3 % alueella 2 - 98 % ja $\pm 0,5$ °C alueella -20...70 °C.

Tutkimusalueita oli yhteensä 5, joissa käytettiin eri tuuletusratkaisuilla toteutettuja alueita vastaavasti kuten aiemmassa tutkimuksessa [9]. Alueilla 1 - 4 oli kantavana rakenteena ontelolaatta (kuva 38, oikea rakenne) ja alueella 5 kantava profiilipelti (kuva 38, vasen rakenne). Alueella 5 höyrynsulkuna oli Euratex-AL ja muissa alueissa kumibitumikermi. Alueiden 2, 4 ja 5 rakenneratkaisu oli umpinainen, eli rakenteessa ei ollut ilmavirtausta mahdollistavia tuulettimia. Alueella 1 oli 110 mm alipainetuulettimet mitapisteen 1 vieressä ja alueen alaosassa 0,5 m räystäältä. Alaosassa alipainetuulettimen yhteyteen oli rakennettu kokoojakanava ($100 \times 20 \text{ mm}^2$), joka toimi rakenteessa räystästuuletuksen tapaan. Alueella 3 oli tuuletusurallinen alempi kivivillalevy, mutta uritus ei ulottunut koko alueelle (kuva 30). Alueen 3 tuuletusurien ilmavirtaus oli järjestetty 160 mm alipainetuulettimilla ja kokoojakanavilla. Alueiden 1 ja 3 tuuletus avattiin 7.7.2011. Alueet 1 - 3 oli erotettu toisistaan Euratex-AL -monikerroslaminaatilla ja PVC-kermillä. PVC-kermi asennettiin höyrynsulkuun bitumiliimauksella ja vesikatteeseen kuumailmapuhalluksella. Alueet on esitetty kuvissa 29 - 37.

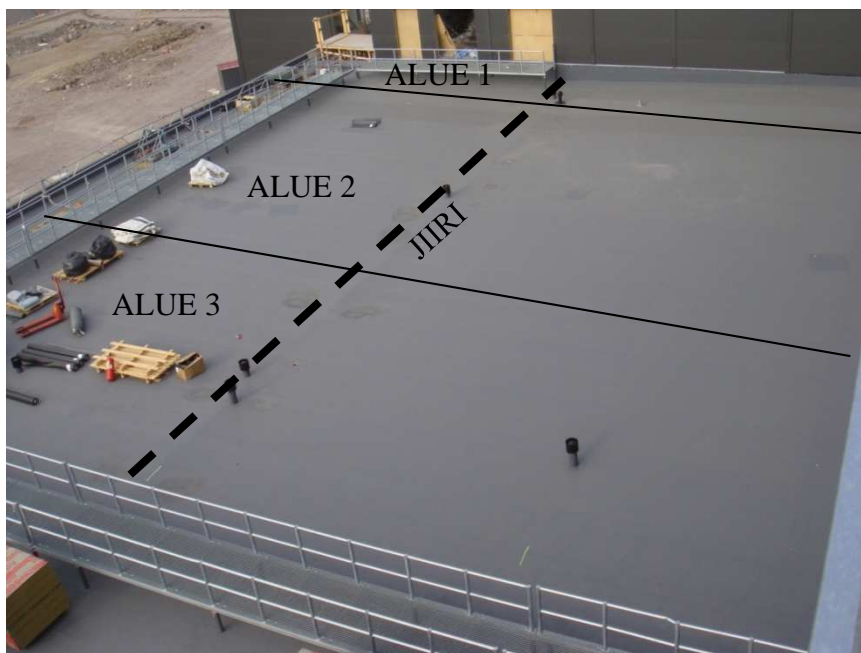


Kuva 29. Kenttätutkimuksen tutkimusalueet sijaitsivat logistiikkakeskuksen lounaisosassa. Rakennuksen korkeudet on arvioitu. Taulukossa on esitetty alueiden pinta-alat ja tuuletusperiaate.

Alueet sijaitsevat kuvien 28 ja 29 mukaisesti suuren kattopinnan alapuolella, mikä tulee huomioida ilmavirtauksien reittiä ja voimakkuutta arvioitaessa. Ilmanvaihtokonehuone alueiden 4 ja 1 välissä varjostaa alueen 4 yläosaa jonkin aikaa kesäpäivinä.



Kuva 30. Tutkimusalueiden 1 - 3 mittapisteeet 1 - 9. APT 110 = 110 mm alipainetuuletin. Kk = koojakanava. Jiiri on osoitettu katkoviivalla.



Kuva 31. Tutkimusalueet 1 - 3 valmiina. Etualalla alueen 3 yläosan 160 mm alipainetuuletin.

Alueen 3 tuuletusurat olivat kooltaan $20 \times 30 \text{ mm}^2$, ja niitä oli 180 mm kivivillan yläpinnassa jaolla k220. Urituksen määrä vastaa aiempia tutkimuksia, $20 \times 30 \text{ mm}^2$ jaolla k200 [8] ja $40 \times 30 \text{ mm}^2$ jaolla k300 [12]. Jälkimmäisessä tutkimuksessa käytettiin te-

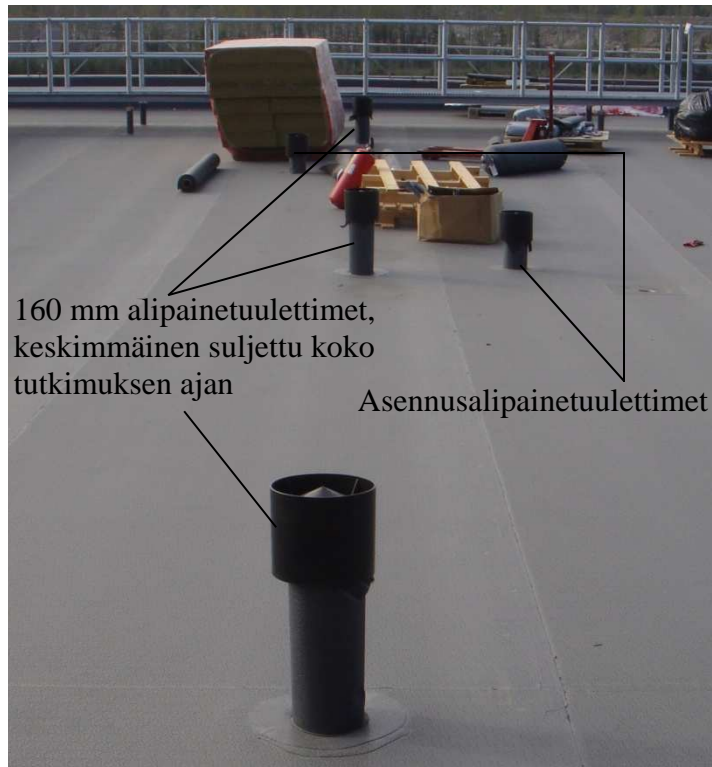
hokkaampaa tuuletusta, $4000 \text{ mm}^2/\text{m}$ (urien pinta-ala metrin leveydellä), kuin kenttätutkimuksessa tai lähteessä [8], $2700 - 3000 \text{ mm}^2/\text{m}$. Uran dimensiot ovat tyypillisesti $20 - 30 \times 30 - 50 \text{ mm}^2$, k200 [16]. Kokoojakanavien etäisyys alueella 3 oli 18m. Yli 20 m etäisyyttä ei suositella normaalilla rakentamisen laadulla [8, s.15].



Kuva 32. Osassa aluetta 3 käytettiin uritettua kivivillaa. Urat suuntautuivat jiiristä räystäälle. Ylempänä kuvassa alue 2 kateasennusvaiheessa.



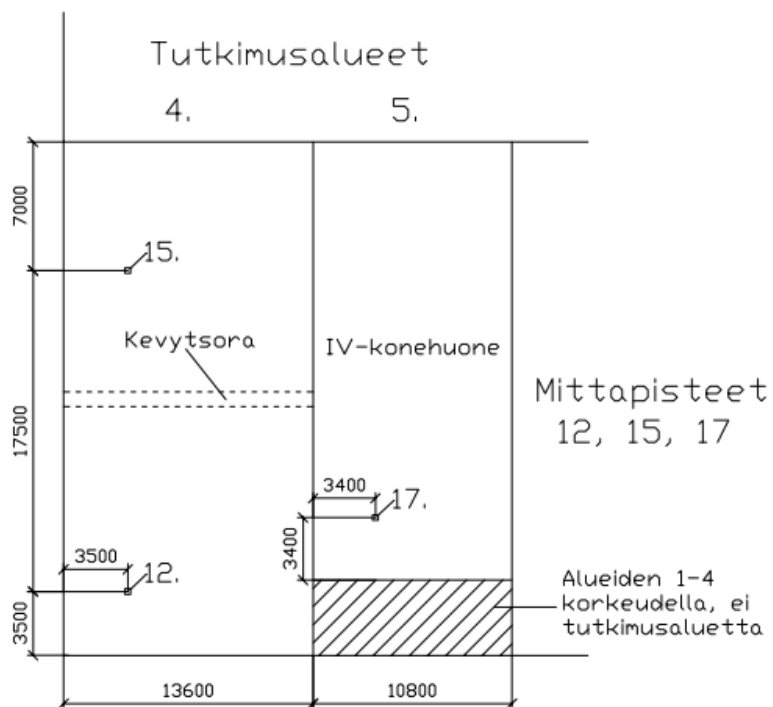
Kuva 33. Alueen 1 alipainetuuletin (110 mm) räystäällä. Jiirissä oli vastaava tuuletin ilman kokoojakanavaa. Räystäään ratkaisulla pyrittiin mallintamaan räystästuuletusta.



Kuva 34. Alueen 3 alipainetuulettimet ja asennusalipainetuulettimet pohjoisesta katsottuna.



**Kuva 35. Tutkimusalueet 1-3 erotettiin toisistaan Euratex-AL ja PVC-kermin yhdistelmällä. Ker-
mi liimattiin höyrynsulkuun bitumilla ja hitsattiin katteeseen.**

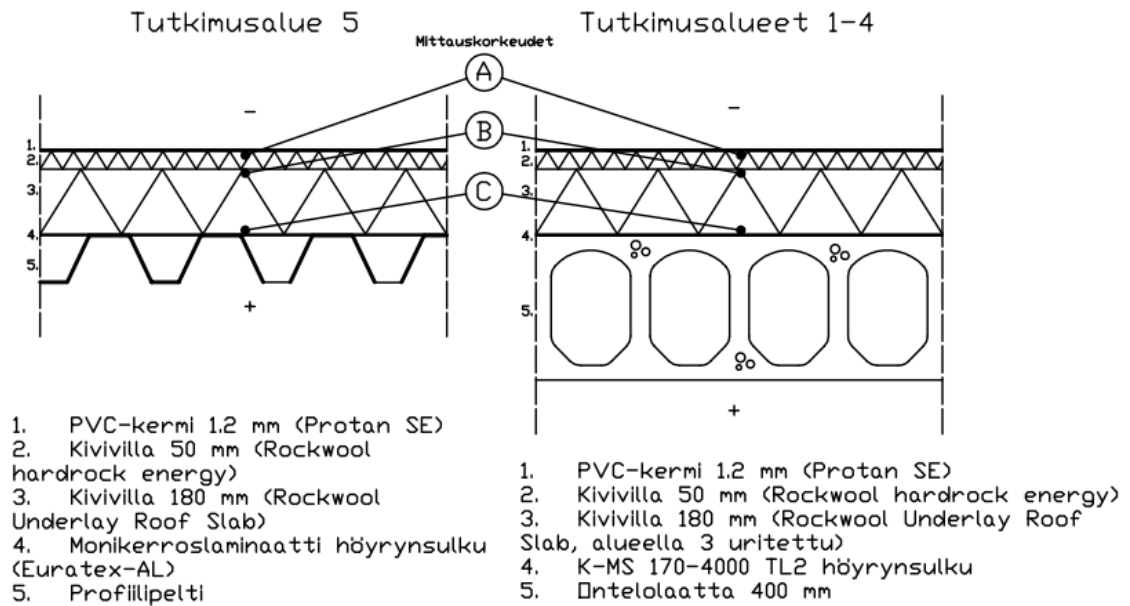


Kuva 36. Tutkimusalueiden 4 ja 5 mittapisteet 12, 15 ja 17.



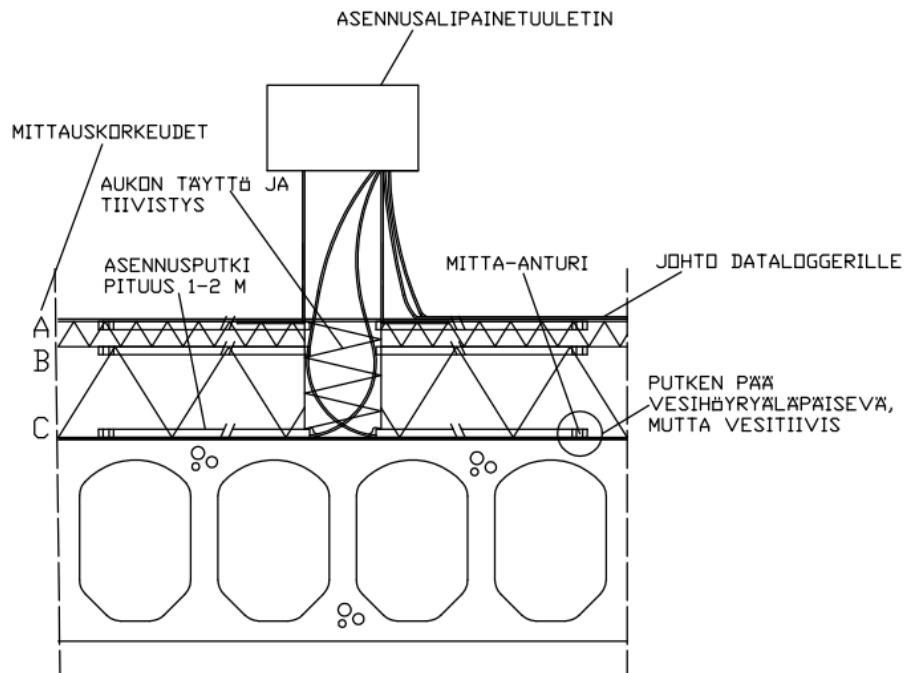
Kuva 37. Tutkimusalueen 5 höyrynsulku asennettiin suoraan poimulevyn päälle. Asennusperiaatteen ja katon läpivientien vuoksi höyrynsulusta oli vaikea saada ilmatiivistä.

Tutkimuksessa oli kahdentyyppisiä kattoja. Rakennetyypit ja mittauskorkeudet on esitetty kuvassa 38.

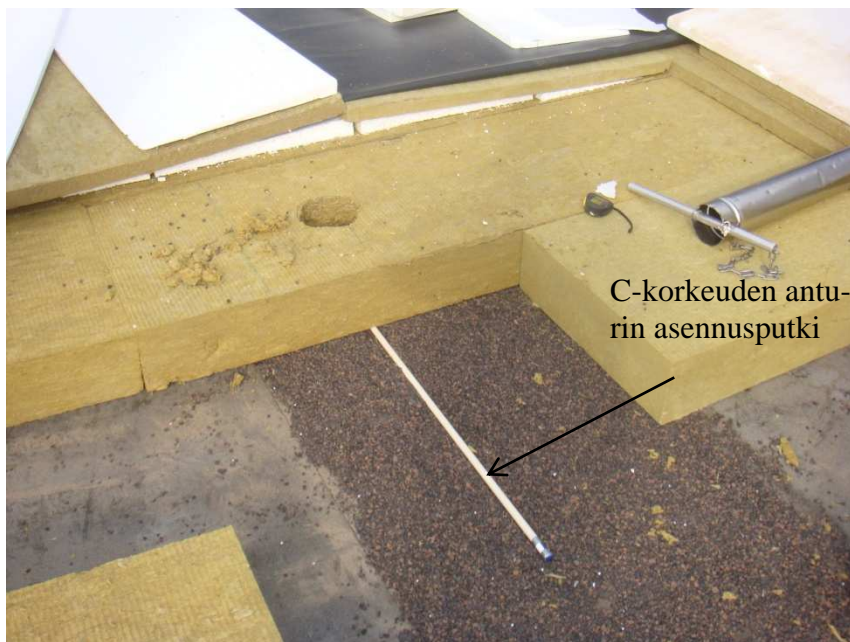


Kuva 38. Kenttätutkimuksen yläpohjarakenteet. Tutkimusalueen 5 yläpohjan kantava rakenne oli profiilipelti. Muiden alueiden kantavana rakenteena oli ontelolaatta. Kuvassa on lisäksi esitetty mittauskorkeudet A, B ja C.

Tutkimukseen tarvittavat asennustyöt tehtiin katon rakentamisen yhteydessä. Kattoihin asennettiin mitta-antureille asennusputket, joiden kautta anturit voitiin myöhemmin asentaa rakenteeseen. Asennusputkien päät olivat asennusalipainetuulettimen alapuolella, josta poistettiin villat. Myöhemmin lämmöneristeeseen tehty aukko täytettiin villalla ja tiivistettiin yläpinnasta vesihöyrytiiviisti. Kuvassa 39 on esitetty asennusalipainetuulettimen avulla toteutettu mittausjärjestely.



Kuva 39. Asennusalipainetuulettimen ja asennusputkien avulla mittaus-anturit voitiin asentaa rakenteeseen jälkeinpäin. Asennusputkia asennettiin kolmelle korkeudelle A, B ja C.



Kuva 40. Alueiden 1 - 4 kaato jiirissä tehtiin EPS-kiiloilla. Jiirin pohjalla oli 20 mm kerros kevytso-
raa, jotta vesi pääsee höyrynsulun päältä kattokaivoihin.

Asennusalipainetuulettimelta anturien johdot vietiin katteen päältä mittalaitelaatikkoon, jossa säilytettiin tutkimukseen liittyviä mittalaitteita. Mittalaitelaatikko on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41. Kenttätutkimuksessa käytetty mittalaitelaatikko sijaitsee alueella 3. Ulkoilman olosuhteita mitattiin säteilysuojaan. Kuvassa näkyy myös tuulen nopeus- ja suunta-anturit.

Ulkoilman olosuhteita mitattiin alueella 2 säteilysuojaan, ks. kuva 41. Sisäilman olosuhteita mitattiin alueen 2 alapuolelta, minkä ilmatila on yhtenäinen alueille 1 - 4, sekä ilmanvaihtokonehuoneesta alueen 5 alapuolelta.

Rakennuskosteus oli alueilla 1 ja 2 korkein, kun taas muilla alueilla rakennuskosteuden määrä jäi vähäiseksi. Rakennusaikaiset olosuhteet on kuvattu taulukossa 19. Keväinen rakentamisajankohta alensi katon rakennuskosteuden määrää verrattuna aiemmin tehtyihin rakennuksen osiin.

Taulukko 19. Tutkimusalueiden rakentamisen aikainen sää vaikutti rakennuskosteuteen siten, että alueilla 1 ja 2 oli muita alueita enemmän kosteutta.

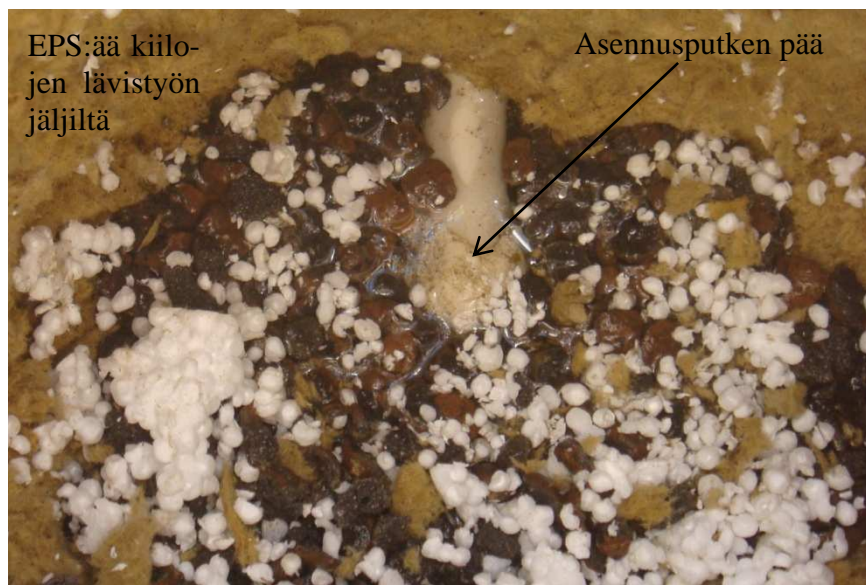
Tutkimusalue	Rakennusajankohta	Sää rakennus- aikana
1	21.4.–22.4.2011	Pilvistä, kosteaa, 22.4 sadetta 1,7 mm ja 20.4 0,1 mm
2	21.4.–24.4.2011	Pilvistä, kosteaa, 22.4 sadetta 1,7 mm. 23.4 eteenpäin kuivaa ja pilvetöntä.
3	23.4.–24.4.2011	Ei sadetta, aurinkoista
4	18.4.–19.4.2011	Ei sadetta, aurinkoista
5	15.4.–16.4.2011	Ei sadetta, aurinkoista

Rakennusaikana käytettiin sääsuoja työajan ulkopuolella, mutta suojauksesta huolimatta sade ja yön vastasäteily nostivat rakennuskosteuden määrää. Alueilla 1 ja 2 kantavan

rakenteen päältä poistettiin ennen eristeiden asennusta yön aikana laatan päälle kertynyt vesi puhaltamalla se kaivoihin. Rakennuskosteus oli kuitenkin havaittavissa valmiissa katossa mittapisteiden 1 ja 4 (ks. kuva 30) asennusalipainetuulettimista katsomalla (kuva 42). Jiirin pohjalla oli vettä kevytsorakerroksen yläpintaan ($h \approx 20$ mm). Jiirissä käytettiin kevytsoraa, koska rakennuksen rungon vuoksi kattokaivot eivät voineet sijaita täsmälleen katon jiirissä. Rakennuskosteuden määrä on alueilla 1 ja 2 luokkaa $0,350 \text{ l/m}^2$ laskettuna taulukon 20 mukaan. Kosteudenhallinnalla saatiin täten poistettua noin 80 % alueille sataneesta vedestä.

Taulukko 20. Rakennuskosteuden arviolaskenta tutkimusalueilla 1 ja 2 katon jiirissä.

Tutkimus- alue	Kevytsoran tilavuus [m ³]	Kuivatiheys [kg/m ³]	Tiheys vesi- kyllästettynä [kg/m ³]	Kapillaarinen vesi [kg/m ³]	Kapillaarinen vesi [kg]	Ala [m ²]	Rakennuskosteus- den määrä [l/m ²]
1	0,116	400	1000	600	69,6	198	0,35
2	0,235	400	1000	600	141	400	0,35



Kuva 42. Tutkimusalueen 2 asennusalipainetuulettimesta näki miten jiirissä oli vettä lammikoituneena. Kuva otettu rakennusvaiheessa 23.4.2011.

Taulukossa 20 esitetty laskelma alueiden 1 ja 2 rakennuskosteudesta on arvio, sillä jiirissä sijaitsevasta alipainetuulettimesta ei voitu havaita kuinka leveällä alueella kosteutta oli.

6.2 Tulokset kenttätutkimuksesta

6.2.1 Yleistä tuloksista ja sisä- sekä ulkoilman mittaustulokset

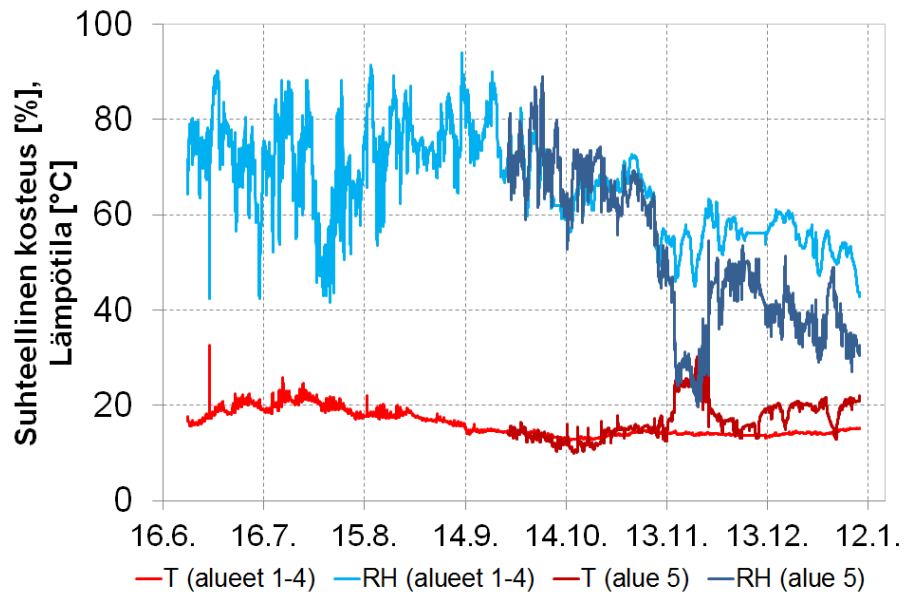
Alueilta 1 - 3 on mittaustuloksia ajalta 17.6–18.12.2011. Alueiden 1 - 3 mittausdatassa on katkos aikavälillä 7.11.2011–10.11.2011. Alueiden 4 ja 5 mittaus alkoi 27.8.2011 ja päättyi 28.12.2011. Pisteiden 12A lämpötila-anturi alkoi antaa epäluotettavia arvoja 5.10 alkaen, jonka jälkeen pisteen absoluuttinen kosteus on laskettu pisteen 15A lämpötilamittaukseen perustuen. Pisteiden 1C ja 4C mittaus tapahtui ajalla 22.8–18.12.2011. Pisteiden 1C lämpötila-anturi alkoi toimia 10.11 eteenpäin. Pisteiden 4C lämpötila-anturi toimi vain lyhyen aikaa elo-syyskuussa. Pisteiden 1C ja 4C mittauserongelmat johtuivat pisteiden korkeasta kosteudesta. Näiden pisteiden tulokset on esitetty liitteessä 2 poikkeuksellisesti oranssilla.

Tuloksia on esitetty ajanjaksoilta 2.–4.7.2011 ja 4.–7.11.2011, jotka kuvaavat kesää ja syksyä. Kesän tuloksien tulkinnassa tulee ottaa huomioon, että 2.–3.7. olivat aurinkoisia päiviä ja 4.7.2011 oli pilvinen päivä. Pidemmän ajanjakson tulokset ovat päiväkeskiarvoja.

Tuloksista on esitetty mitatut lämpötilat ja suhteelliset kosteudet sekä näiden perusteella laskettu absoluuttinen kosteus. Suhteellisilla kosteuksilla 97 - 100 % ei absoluuttinen kosteus ole vertailukelpoinen niiden tuloksien kanssa, joiden suhteellinen kosteus oli alle 97 %.

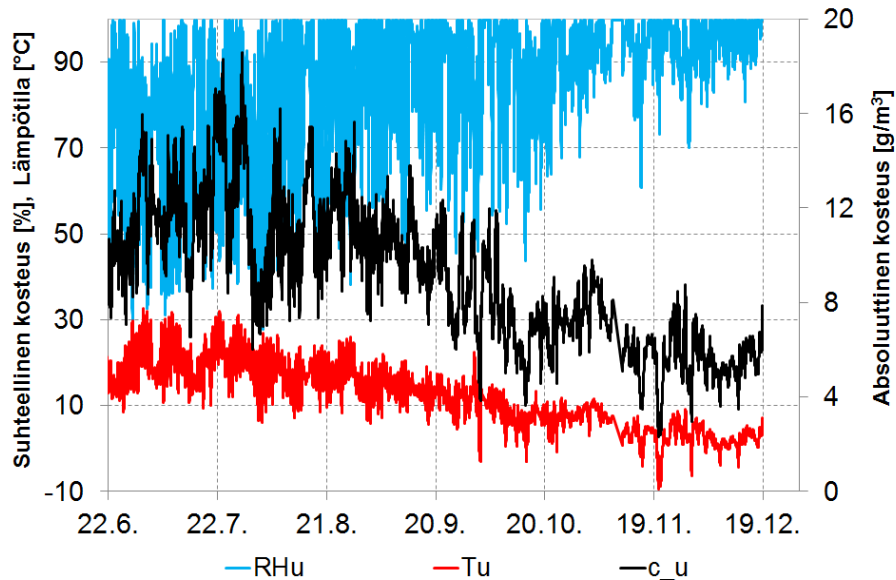
Kohdekäyntien yhteydessä arvioitiin eristeen kosteusmäärää katsomalla asennusalipainetuulettimeen, mistä on myös esitetty kuvia kappaleessa 6.3. Nämä kuvat ovat suuntaa antavia, sillä asennusalipainetuulettimen kohdalla eristeessä on epäjatkuuskohta, koska aukko on täytetty pehmeällä kivivillalla. Kuvia tulee verrata mittaustuloksiin.

Kuvassa 43 on esitetty sisäilman lämpötila, absoluuttinen kosteus ja suhteellinen kosteus. Kesällä alueiden 1 - 4 alapuolinen sisäilma oli yhtä lämmintä kuin ulkoilma ja ulkoilmaa kuivempaa. Syksyllä sisäilman lämpötila oli alle normaalin, joten tämä saattoi vaikuttaa kosteuden kondensoitumisen mahdollisuuteen pisteessä C. Sisäilman lämmitys aloitettiin lokakuussa. Alueella 5 sisäilman olosuhteet olivat lämpimämmät ja kuivemmat kuin muilla alueilla.



Kuva 43. Sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus kenttätutkimuksen aikana.

Kuvassa 44 on esitetty ulkoilman olosuhteet tutkimuksen aikana. Kuvan 13 perusteella kenttätutkimuksessa ulkoilman kosteus oli läpi vuoden noin 1 - 2 g/m³ korkeampi kuin Helsingissä keskimäärin. Talvella joulukuuhun mennessä ulkoilman lämpötila ei laskeutunut juurikaan pakkaselle, joten lämpötila oli normaalia Etelä-Suomen tasoa korkeampi [15, s.37]

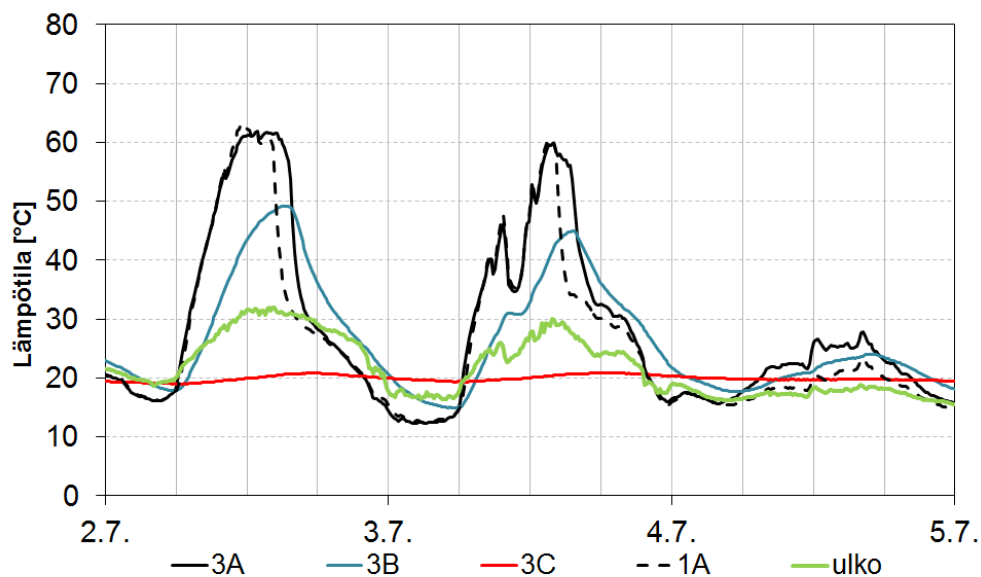


Kuva 44. Ulkoilman suhteellinen kosteus RH_u , lämpötila T_u ja absoluuttinen kosteus c_u kenttätutkimuksen aikana.

Kappaleissa 6.2.2–6.2.4 on esitetty oleelliset tulokset kenttätutkimuksesta. Liitteessä 2 on esitetty lisää mittaustuloksia kenttätutkimuksesta.

6.2.2 Lämpötilan mittaustulokset

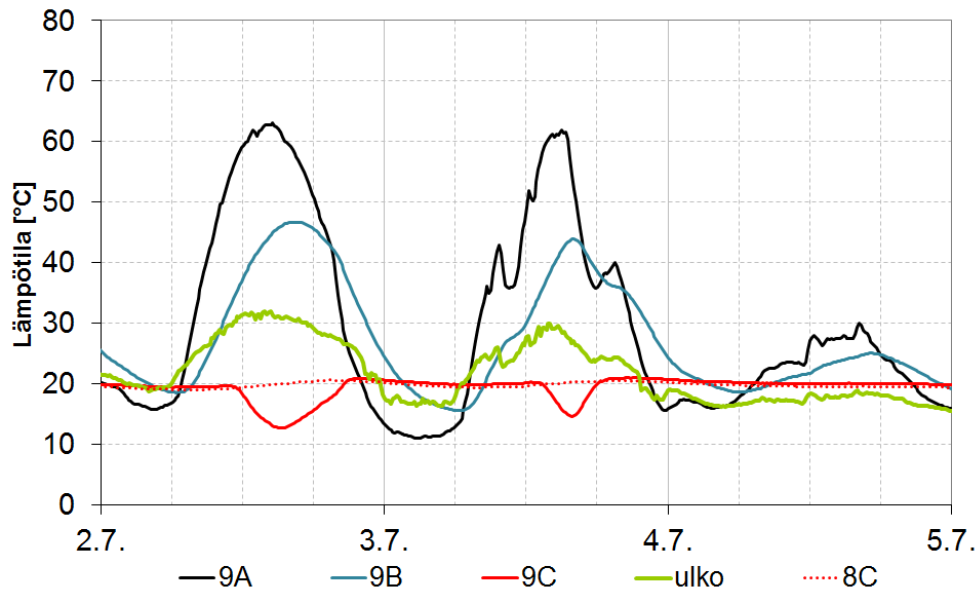
Tutkimusalueen 1 lämpötilat heinäkuussa 2.–4.7.2011 ja marraskuussa 4.–7.11.2011 on esitetty kuvissa 45 ja 46. Lämpötila tutkimusalueella oli korkeimmillaan 60 - 70 °C. Taulukon 4 mukaan tummanharmaan PVC-katteen ylälämpötila on 45 °C. Kenttätutkimuksessa ylälämpötila oli 28.6 pisteessä 6A 37 °C. Katteen lämpötila oli tällöin kesän korkein, 65 °C.



Kuva 45. Tutkimusalueen 1 lämpötilat heinäkuussa. Tummanharmaan PVC-katteen lämpötilat kohoavat yli 60 °C:een.

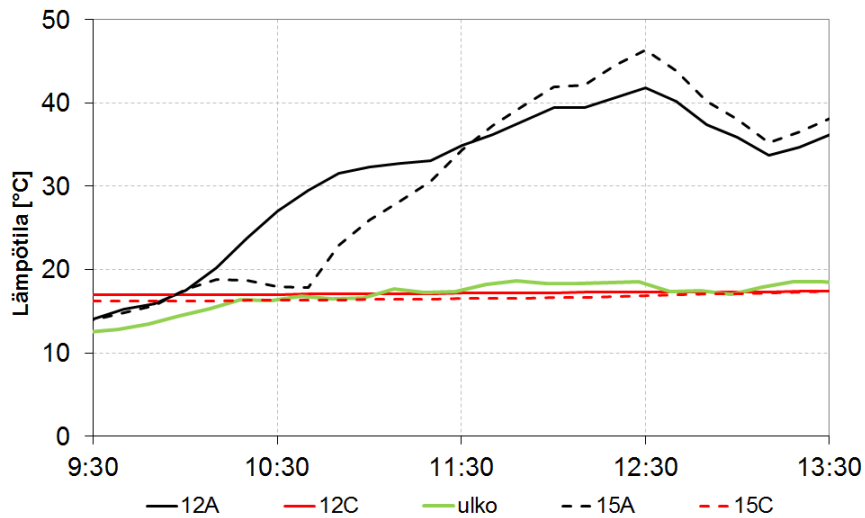
Pilvisinä kesäpäivinä kattopinnan lämpötila nousi pienimmillään noin 2 °C yli ulkoilman lämpötilan. Suurin osa vuoden 2011 kesäpäivistä, noin 80 %, oli aurinkoisia. Pisteessä C lämpötila ei muutu juuri lainkaan, koska mittapiste sijaitsee lämmöneristeen alapuolella. Kesällä rakennuksen sisäilman lämpötila riippui ulkoilman lämpötilasta, sillä rakennuksessa ei ollut tällöin lämmitystä. C pisteen lämpötila on ulkoilmaa tasaisempi, koska piste sijaitsee lämmöneristeen ja ontelolaatan välissä.

Tutkimusalueen 3 lämpötilat heinäkuussa 2.–4.7.2011 on esitetty kuvassa 46. Piste 9C lämpötila laskee selvästi auringonpaisteella. Tämä johtuu kosteuden haihtumisesta anturin pinnalta, jolloin pinnan lämpötila alenee. Haihtuva kosteus on mahdollisesti peräisin lämmöneristeen yläpinnasta, mistä se siirtyy alaspäin anturin korkeudelle. Lopulta pisteen 9C lämpötila palaa tasapainotilaansa, kun kosteuden haihtuminen on lopunut.



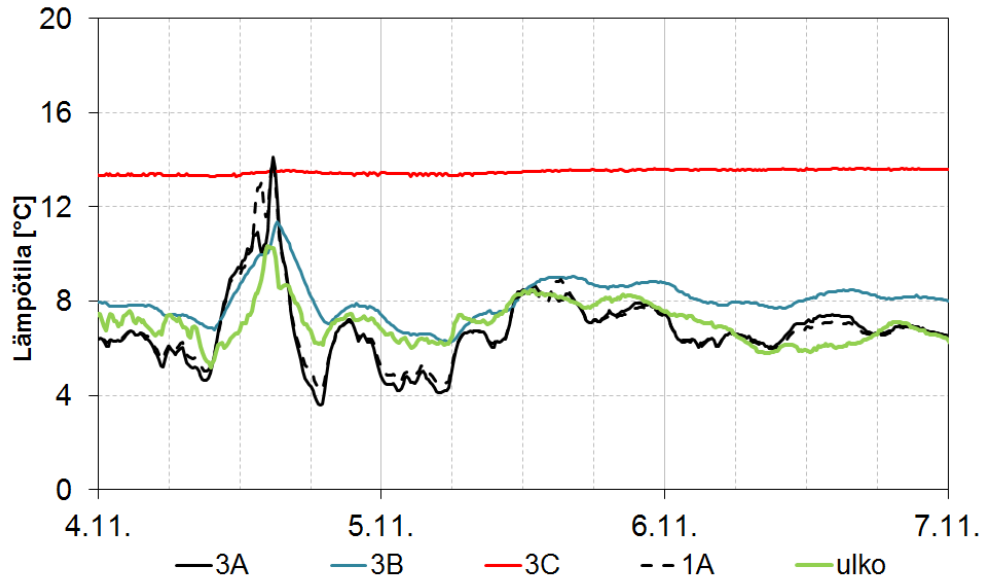
Kuva 46. Tutkimusalueen 3 lämpötila heinäkuussa.

Kuvassa 42 on esitetty alueen 4 lämpötila kesäpäivänä. Alueen yläosassa olevan pisteen 15 lämpötila ei nouse yhtä nopeasti kuin katon alaosassa. Hitaammin lämpiävän kohdan nopea lämpiäminen saattaa johtua ilmavirtauksesta lämmöneristeessä, joka kuljettaa lämpöä katon sisällä. Toisaalta aurinko paistaa varjoisalle katolle jyrkemmässä kulmassa, jolloin säteilyn intensiteetti on suurempi.



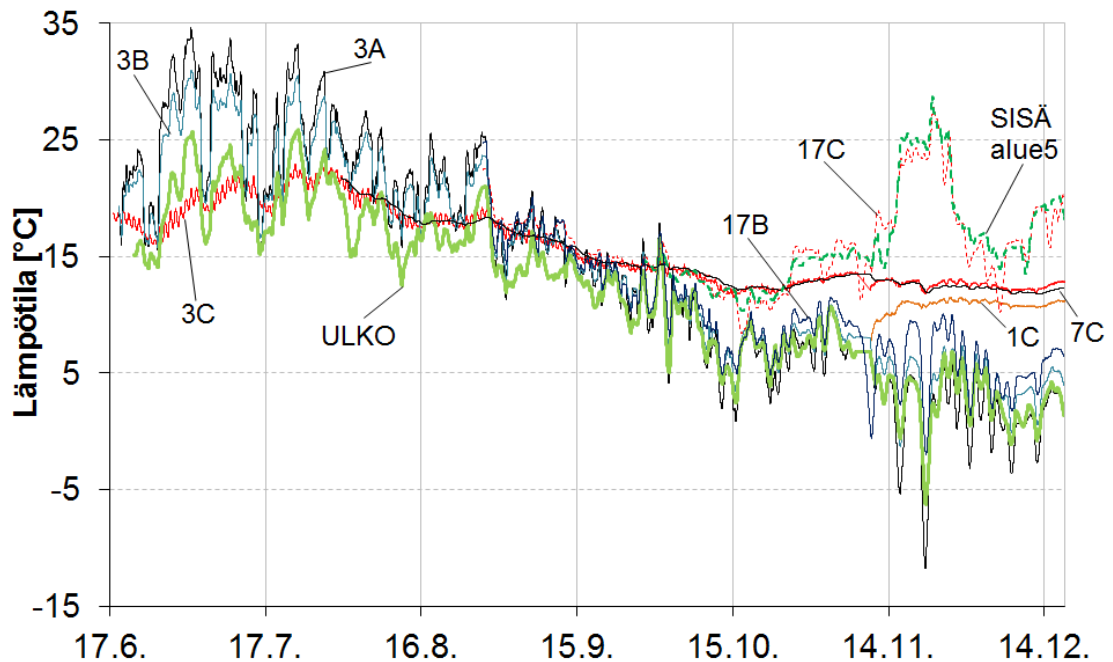
Kuva 47. PVC-katot lämpiävät eri aikaan varjoisilla alueilla. Kuvan tapauksessa pistettä 15 varjos-
ti pisteen oikealla puolella oleva etelä-pohjoissuuntainen seinä. Pisteen ja seinän välinen kulma oli
noin 30 astetta.

Marraskuussa kattojen lämpötilajakauma muuttuu siten, että pisteen C lämpötila on korkein ja muut pisteet ovat lähellä ulkoilman lämpötilaa. Pinnan lämpötila laskee läpi vuoden ajoittain alle ulkoilman yön vastasäteilyn vaikutuksesta. Syksyllä ja talvella ei esiinny voimakkaita katon yläpinnan lämpötilavaihteluita.



Kuva 48. Tutkimusalueen 1 lämpötila marraskuussa.

Tutkimusalueiden lämpötiloja koko mittausjaksolla on esitetty kuvassa 49. Kuvaaja esittää päiväkeskiarvoja. Kesällä katon yläosan ja ulkoilman lämpötilaero syntyy auringon säteilyn vaikutuksesta. Syksyllä ulkolämpötila ja katon yläosan lämpötila ovat samaa luokkaa, koska auringon säteilyn intensiteetti kattopinnalle on vähäinen. Lämmöneristeen alapinnan lämpötila on läpi vuoden tasaisin.

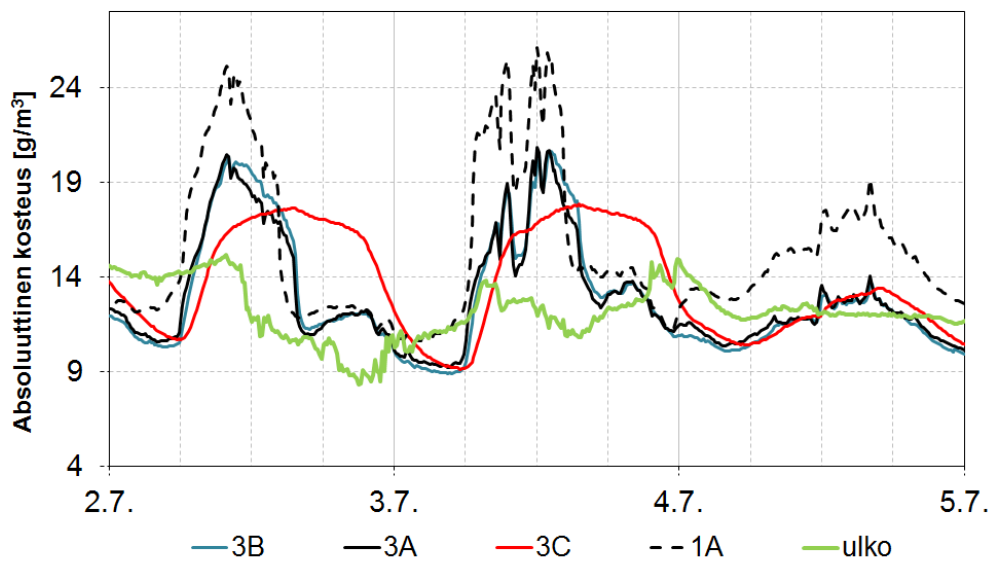


Kuva 49. Tutkimusalueiden keskimääräisiä lämpötiloja mittausjaksolla. Mittapisteet on esitetty kuvissa 30 ja 36.

Alueen 2, 3 ja 4 lämpötilan mittaustulokset vastasivat suurimmaksi osaksi alueen 1 tuloksia eli pisteitä 3A, 3B ja 3C. Jiirissä pisteen 1C lämpötila oli marras-joulukuussa alempi kuin alueella 3 pisteen 7C. Ilmanvaihtokonehuoneen lämpötila oli korkeampi kuin alueiden 1 - 4 alapuolisen tilan, joten pisteiden 17C ja 17B lämpötilat ovat korkeammat kuin muilla alueilla. Pisteiden 17C lämpötila on hyvin lähellä sisäilman lämpötilaa, johtuen poimulevyn pienestä vaikutuksesta lämmönsiirtymiseen. Talvella katon yläosan lämpötilat eivät riipu sisäilman lämpötilasta, sillä pisteiden 3A ja 17A lämpötilat olivat vastaavia.

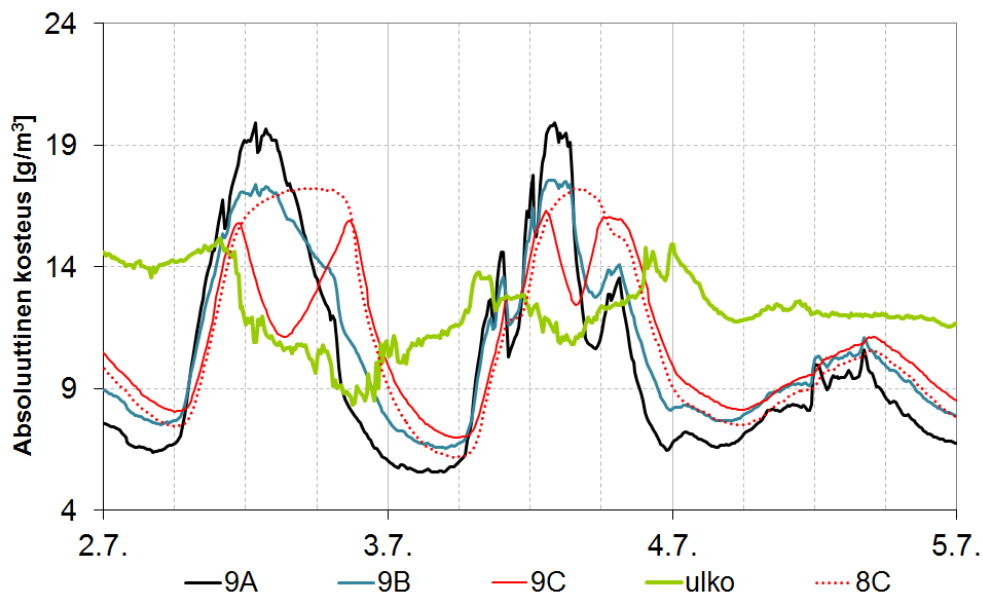
6.2.3 Absoluuttisen kosteuden mittaustulokset

Tutkimusalueen 1 lämmöneristeen huokosilman absoluuttiset kosteudet heinäkuussa 2.–4.7.2011 ja marraskuussa 4.–7.11.2011 on esitetty kuvissa 50 ja 52. Heinäkuussa mittapisteen 1 kosteus on suurempi kuin pisteen 3. Kosteutta on katon jiirissä (piste 1) niin paljon, ettei se ehdi tasaantua lämmöneristeessä diffuusiolla tai konvektiolla tarkasteluaikana. Tämä tarkoittaa, että kosteutta on rakenteessa vetenä niin paljon, että koko rakenteen hidas kuivuminen diffuusiolla ei näy tuloksissa. Mittapisteen 1 C-korkeudella oli 2.–4.7.2011 kosteutta vetenä, josta syystä pisteen absoluuttista kosteus määrää ei ole ilmoitettu.



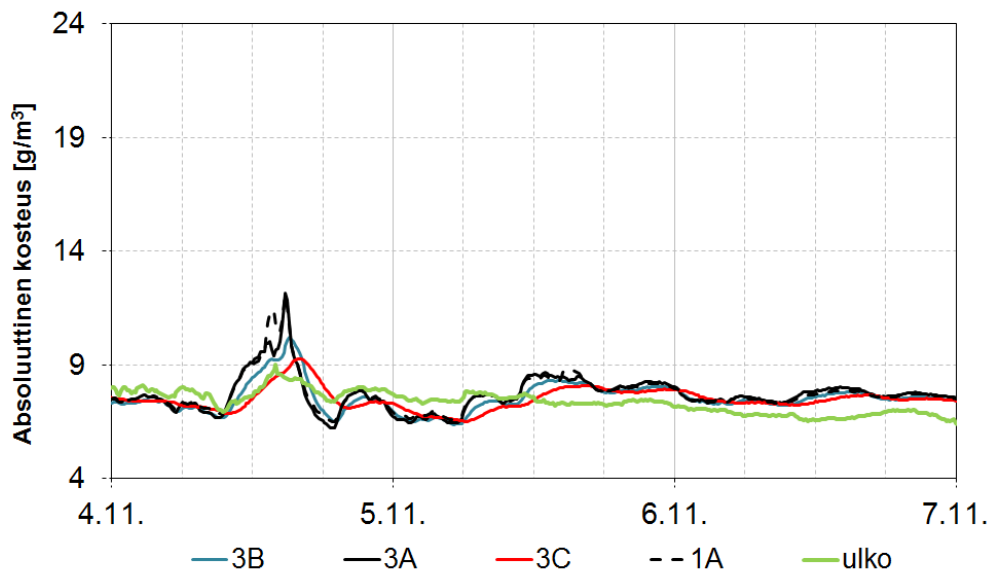
Kuva 50. Tutkimusalueen 1 absoluuttinen kosteus heinäkuussa.

Tutkimusalueen 3 absoluuttiset kosteudet heinäkuussa 2.–4.7.2011 on esitetty kuvassa 51. Absoluuttinen kosteus käyttäytyy heinäkuussa eri lailla kuin alueella 1. Piste C kosteus nousee pisteen A perässä, mutta alueen 3 lämmöneriste on kuivempi kuin alueella 1, jolloin alueella 3 eriste ei pysty ottamaan vastaan ylhäältä tulevaa kosteutta. Kosteus tiivistyy ja haihtuu huokosilman ja eristeen huokospinnan välillä. Kuvassa 52 huokosilman absoluuttisen kosteuden lasku keskipäivällä pisteessä C lieenee laskennallinen, ja todellisuudessa kosteusmäärä vastaa pistettä 8C. Laskennallinen absoluuttinen kosteus laskee samalla, kun pisteen lämpötila laskee kondensoitumisen vaikutuksesta.



Kuva 51. Tutkimusalueen 3 absoluuttinen kosteus heinäkuussa.

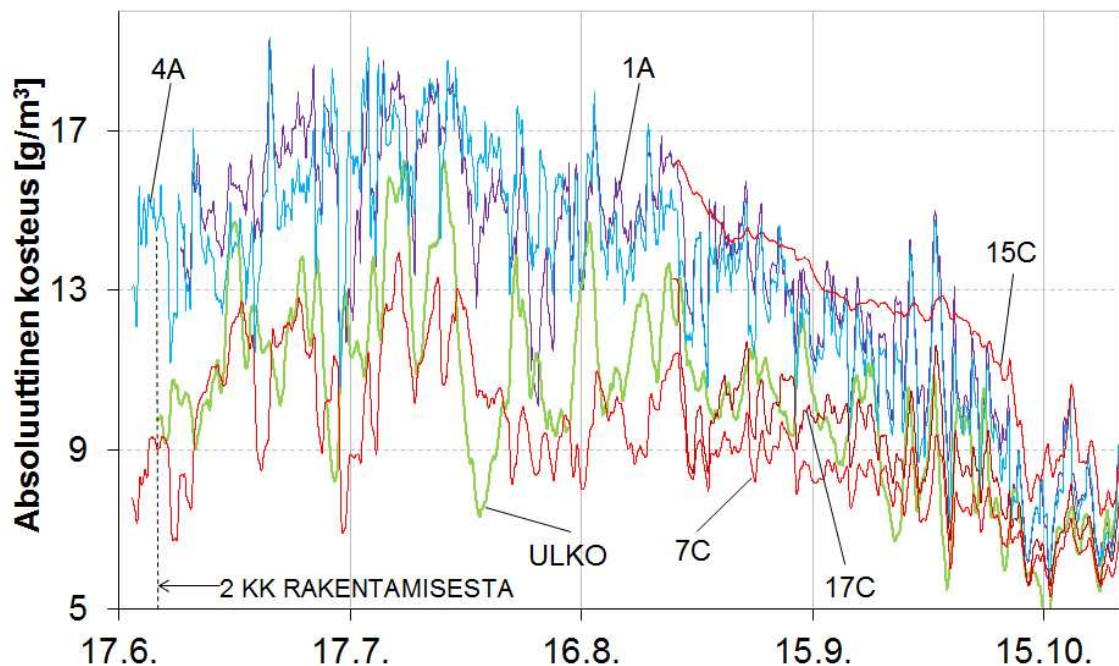
Marraskuun kosteuspitoisuudet ovat hyvin tasaisia johtuen auringon säteilyintensiteetin heikkenemisestä ja kosteuden sitoutumisesta lämmöneristeeseen.



Kuva 52. Tutkimusalueen 1 absoluuttinen kosteus marraskuussa.

Kuvassa 53 on esitetty absoluuttinen kosteus 24.10 asti, jonka jälkeen absoluuttiset kosteuden tasaantuivat vesihöyryn tiivistyttyä katon yläosiin. Kosteus on alueiden 1 ja 2 jiirissä pisteissä 1A ja 4A selvästi korkeampi kuin ulkoilmassa. Pisteiden 1C ja 4C absoluuttista kosteutta ei voitu määrittää, sillä pisteiden suhteellinen kosteus oli 100 % koko tutkimuksen ajan. Alueella 1 pisteessä 3 absoluuttinen kosteus oli kesäheinäkuussa 1 - 2 g/m³ ulkoilmaa korkeampi ja alueella 2 pisteessä 6 2 - 3 g/m³ ulkoilmaa korkeampi. Vastaavaan aikaan absoluuttinen kosteus oli jiirissä alueella 1 korkeampi kuin alueella 2. Syksyllä pisteiden 3 ja 6 absoluuttinen kosteus laski ulkoilman tasolle. Lämmöneristeen kosteusmäärää arvioitiin 17.8 katsomalla asennusalipainetulettimesta ja todettiin, että kivivilla oli pisteen 4 lähellä kuivempaa kuin pisteen 1 ja, että kummissakin pisteissä villa oli hyvin kosteaa.

Alueen 3 absoluuttisista kosteuksista on esitetty pisteen 7C tulokset. Pisteen 7C kuvaaja on 29.7 asti 8C pisteen kuvaajaa. Absoluuttinen kosteus pisteessä 7C on alhaisin kaikista esitetyistä pisteistä. Alueen 3 absoluuttiset kosteudet eivät vaihdelleet alueen eri pisteiden välillä. Rakennuskosteudeltaan aluetta 3 vastaavan alueen 5 absoluuttinen kosteus oli alhainen, mutta se ei alentunut ulkoilman kosteutta alemmas niin kuin uratuulettulla alueella 3.

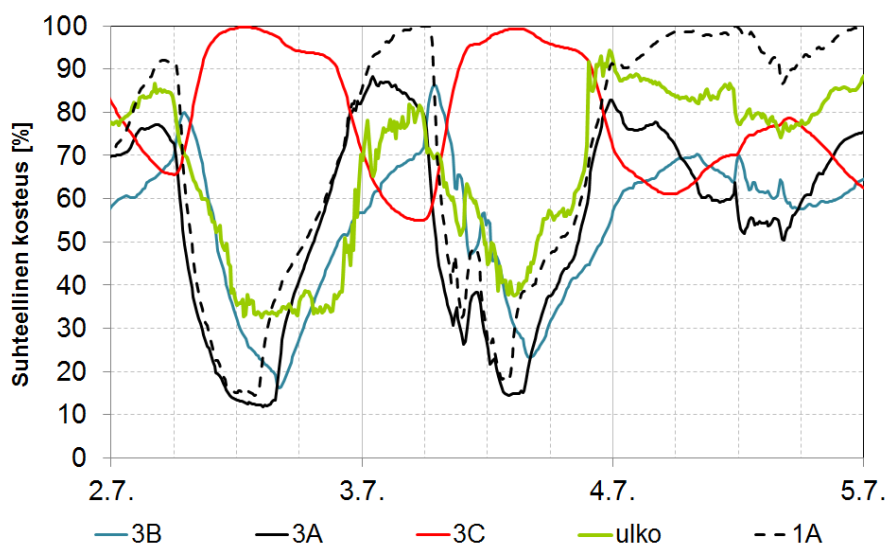


Kuva 53. Tutkimusalueiden absoluuttinen kosteus mittausjaksolla.

Tutkimusalueella 4 absoluuttinen kosteus pisteessä 12 vastasi alueen 5 pistettä 17 eli sen absoluuttinen kosteus oli ulkoilman tasolla. Alueen 4 pisteessä 15 absoluuttinen kosteus oli hyvin korkea, mutta sekin tasaantui loka-marraskuun aikana ulkoilman tasolle.

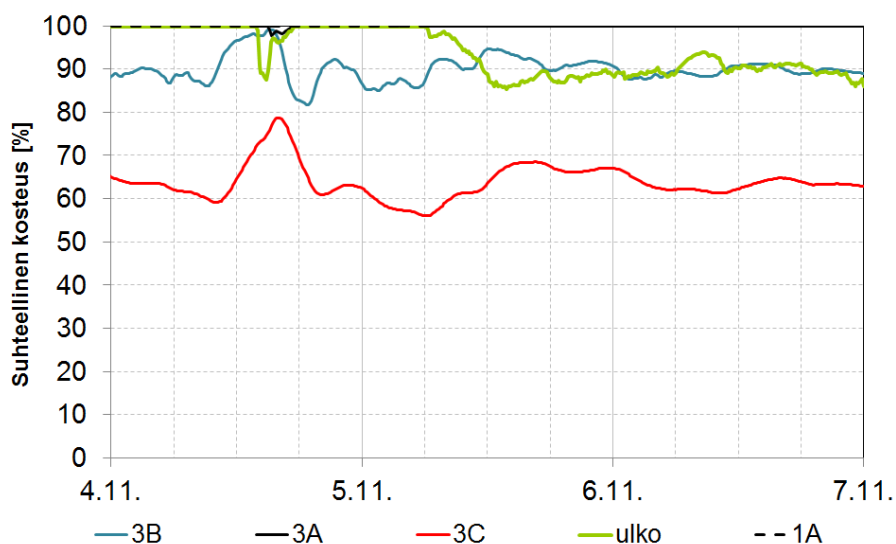
6.2.4 Suhteellisen kosteuden mittaustulokset

Tutkimusalueen 1 suhteelliset kosteudet heinäkuussa 2.–4.7.2011 ja marraskuussa 4.–7.11.2011 on esitetty kuvissa 54 ja 55. Heinäkuussa suhteellinen kosteus rakenteessa vaihtelee päivän mittaan voimakkaasti. Lämmöneristeen alapinnassa pisteessä 3C suhteellinen kosteus vaihtelee välillä 55 - 100 % ja yläpinnassa pisteessä 3A välillä 15 - 100 %.



Kuva 54. Tutkimusalueen 1 suhteellinen kosteus heinäkuussa. Pisteessä 1C suhteellinen kosteus oli ajankohtana 100 %.

Alueella 2 pisteessä 6C suhteellinen kosteus vaihtelee välillä 65 - 100 % ja pisteessä 6A välillä 15 - 100 %. Alueella 3 pisteessä 9C suhteellinen kosteus vaihtelee välillä 40 - 100 % ja pisteessä 9A välillä 15 - 55 %. Alueiden 2 ja 3 kyseiset tulokset on esitetty liitteessä 2.

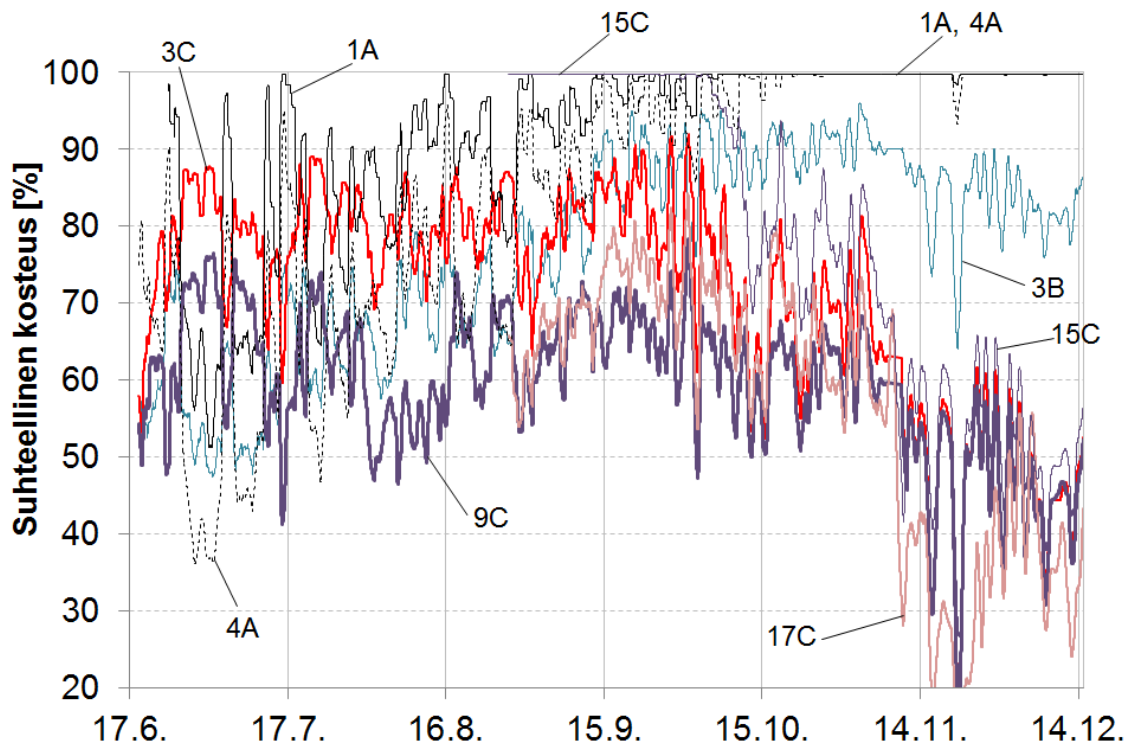


Kuva 55. Tutkimusalueen 1 suhteelliset kosteudet marraskuussa. Kuvan ajanjaksolla pisteet 1A, 1C ja 3A olivat 100 %:n kosteudessa.

Marraskuussa suhteellinen kosteus nousee pisteissä A ja B, kun katon yläosien lämpötilat laskevat. Alhaisin suhteellinen kosteus on pisteessä C, missä lämpötila ei laske juurikaan.

Kuvassa 56 on esitetty tutkimusalueiden suhteellinen kosteus mittausjaksolla. Suhteellinen kosteus on rakenteen yläpinnassa huomattavasti korkeampi syksyllä kuin kesällä ja alapinnassa alempi kuin kesällä. Pisteiden 1C ja 4C suhteellinen kosteus oli 100 % koko tutkimuksen ajan, vaikka kaikissa muissa C korkeuden pisteissä suhteellinen kosteus laski lokakuusta eteenpäin mentäessä.

Talvella 17C pisteen suhteellinen kosteus on hieman alempi kuin uratuuletetussa katos-
sa pisteen 9C. Tämä johtuu ilmanvaihtokonehuoneen hallia lämpimämmästä sisäilmas-
ta, mikä alentaa välittömästi profiilipellin yläpuolella olevan pisteen 17C suhteellista
kosteutta merkittävästi. Suhteellinen kosteus talvella C korkeudella määräytyykin suu-
rimmaksi osaksi pisteen lämpötilasta. Pisteessä 15C suhteellinen kosteus oli lokakuuhun
asti 100 %, mutta sitten aleni muiden C pisteiden tasolla.



Kuva 56. Tutkimusalueiden suhteellisia kosteuksia mittausjaksolla.

Talvella B-korkeudella suhteelliset kosteudet eivät eronneet merkittävästi, mutta alueilla 3 ja 5 suhteellinen kosteus oli 5 - 10 % alempi kuin alueilla 1 ja 2. Alueelta 4 ei mitattu B korkeutta.

6.3 Tulosten tarkastelu

6.3.1 Kosteuden kuivuminen lämmöneristeestä

Uratuuletettu alue 3 oli kaikista alueista kuivin. Uratuuletuksen kuivaavaa vaikutusta ei kuitenkaan nähty, sillä kun mittaukset alkoivat 2 kuukautta rakentamisen jälkeen, ei alueella 3 ollut rakennuskosteutta. Uratuuletuksen avaaminen 2 viikkoa mittauksien alkamisesta ei tästä syystä alentanut alueen kosteus määrää. Alueella 3 absoluuttinen kosteus oli koko mittausjakson selvästi alle ulkoilman, kun taas rakennuskosteudeltaan yhtä kuivan alueen 5 absoluuttinen kosteus oli ulkoilman tasolla. Mittausten jatkuessa vuonna 2012 on suunniteltu tehtävän kastelukoe, missä alueelle 3 lisätään vettä jiiriin ja tarkkaillaan kosteuden kuivumista uratuuletuksella. Valokuvassa 57 on esitetty kivivilan kosteuden määrä alueella 3 katon yläpinnassa joulukuussa.



Kuva 57. Uratuuletetun katon villa oli kuivaa asennusalipainetuulettimesta katsottuna 12.12.2011. Asennusalipainetuuletin sijaitsee jiirissä pisteen 7 vieressä.

Kosteus kuivuu tuulettamattomasta ja tuuletetusta urittamattomasta PVC-katosta yhtä hitaasti. Alueen 1 huokostuuletetun villan lävitse ei ilmeisesti virtaa merkittäviä määriä ilmaa. Alueiden 1 ja 2 rakennuskosteus, noin $0,350 \text{ kg/m}^2$, ei ollut kuivunut huhti-joulukuun aikana. Kosteus oli näillä alueilla suurimmaksi osaksi katon jiirissä. Jiirissä oli kosteutta vetenä pitkälle syksyyn, kunnes vesi alkoi siirtyä eristeen yläosiin. Valokuvasta 58 näkee kuinka alueella 2 kosteutta on jiirissä niin paljon, että kivivilla ei pysty sitomaan sitä hygroskooppisesti. Kosteus on kondensoitunut ja jäänyt villaan ja katteen alle. Katon kosteus jäätyy katteen alapuolella, kun ulkoilman keskilämpötila alittaa 0°C , tai yön vastasäteilyn vaikutuksesta jo aiemmin. Jään muodostuttua kuivuminen pysähtyy ja jatkuu keväällä jään sulaessa ja lumen poistuessa katolta. Jos katon rakennuskosteus on alhainen, ei kosteuden kondensoitumista tapahdu yhtä suuressa määrin, mikä todettiin uratuuletetun alueen tuloksista.



Kuva 58. Ulkoilman kylmetessä kosteus kondensoituu ja jäätyy katon yläosassa. Kuva on otettu 18.11.2011 asennusalipainetuulettimesta tutkimusalueelta 2 pisteen 4 vierestä. Vastaava tilanne oli alueella 1 pisteessä 1.

Alueen 1 jiirin absoluuttinen kosteus oli kesällä kivivillan yläpinnasta korkeampi kuin alueella 2. Samaan aikaan alueiden keskiosassa absoluuttinen kosteus oli korkeampi alueella 2. Kosteuden tasaantuminen jiiristä muualle alueelle oli aluetta 1 tehokkaampaa alueella 2, jonka pinta-ala on 400 m^2 , kun alueen 1 pinta-ala on 198 m^2 . Alueen 1 katteen toinen reuna oli kiinnitetty seinään, mikä alentaa katteen hulmuamista. Tulokset kosteusmittauksista ja alueiden pinta-alasta viittaavat siihen, että mitä isompi yhtenäinen alue kattoa, sitä tehokkaampi PVC-kermin hulmuaminen ja sen aikaansaama kermin alapuolinen ilmavirtaus on.

Talvella marraskuusta eteenpäin eri alueiden mitatut absoluuttisen kosteusmäärät ovat samoja, kun kosteus on siirtynyt katon yläosiin ja muuttunut vedeksi ja jääksi. Suhteellinen kosteus on eri alueilla kylmällä kaudella lähes sama.

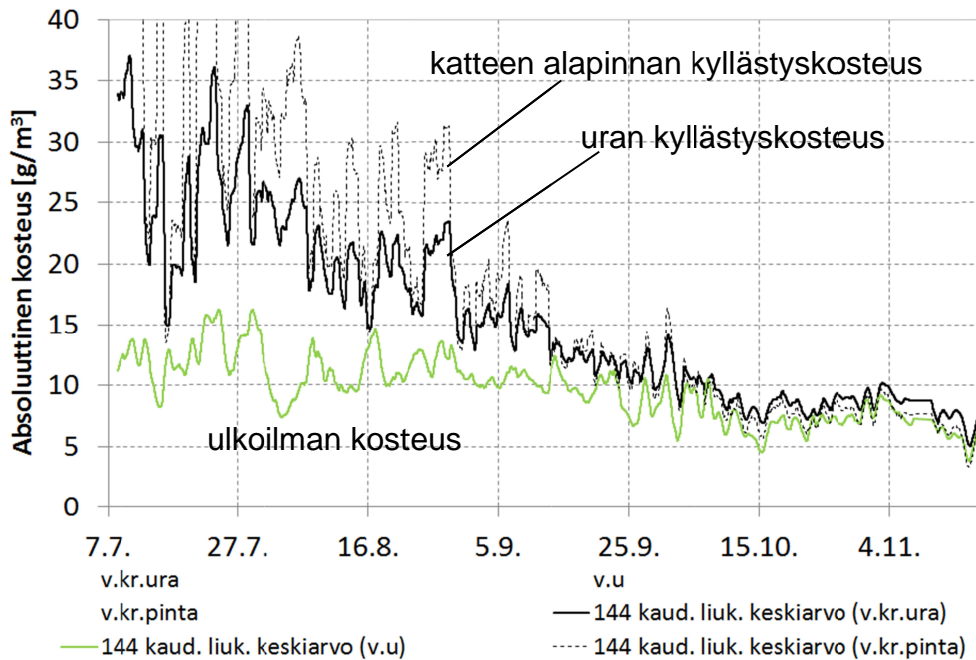
6.3.2 Uratuuletuksen vaikutus rakenteen toimintaan

Uratuulettettu tutkimusalue 3 oli kuivin kaikista tutkituista alueista. Absoluuttinen kosteusmäärä lämmöneristeessä oli suurimman osan kesästä selvästi alle ulkoilman kosteuden. Auringonpaisteessa tuuletusuran lämpötila ja kyllästyskosteus on korkea, jolloin urassa virtaava ilma sitoo ja kuljettaa ulos rakenteesta paljon kosteutta. Suurin vaikutus on eristeen korkean lämpiämisen johdosta hyvin alas laskevalla suhteellisella kosteudella, joka saa eristeen luovuttamaan kosteutta. Lämpimän eristeen hygroskooppinen kosteusmäärä on alempi kuin normaalilämpöisen, mikä tehostaa eristeen kuivumista. Lisäksi lämmöneristeen viilentyessä ulkoilman lämpötilaan eriste sitoo kosteutta enemmän kuin korkeassa lämpötilassa ja alentaa huokosilman kosteusmäärää illalla.

Uratuuletuksen kuivattavaa vaikutusta ei nähty tuloksissa, sillä alue 3 oli jo kuiva mittauksien alkaessa. Alueen 4 absoluuttisen kosteudet olivat kuitenkin selvästi korkeammat kuin alueella 3, vaikka alueen 3 ja 4 kattorakenteet ja rakennuskosteuden määrät ovat samat. Uratuulettettu katto on siis tuulettamatonta kuivempi. Alueiden 1 ja 2 tuloksia ei

voi suoraan verrata alueeseen 3, sillä niiden rakennuskosteuden määrät erosivat. Uratuuletuksen kuivaava vaikutus on luotettavasti todettu bitumikattotutkimuksessa [9]. Liitteessä 3 on esitetty kuvaaja uratuuletuksen kuivaavasta vaikutuksesta [9].

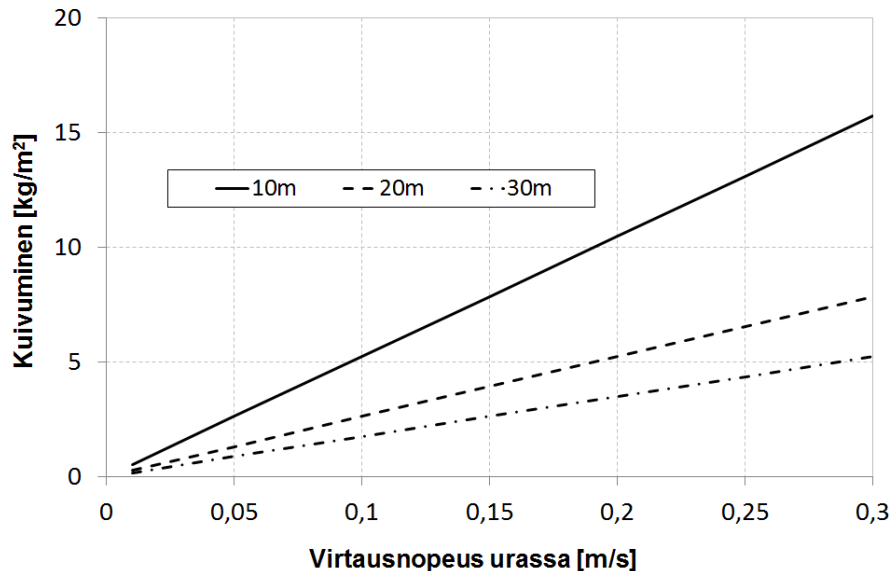
Syksyllä ulkoilman kosteuden noustessa uratuuletus ei siirtänyt ulkoilman kosteutta rakenteeseen. Ulkoilman kylmentyessä ja auringonsäteilyn heikentyessä katon lämmöneristeen yli on pysyvä lämpötilaero. Tällöin uraan virtaava ilma on aina kylmempää kuin katon lämpötila uran syvyydellä 60 mm, joten kosteus ei tiivisty rakenteeseen. Kuvassa 59 on esitetty ulkoilman absoluuttinen kosteussisältö, lämmöneristeen kriittinen kosteuspitoisuus uran korkeudella (uran ilman kriittinen kosteuspitoisuus) ja lämmöneristeen yläpinnassa. Jos uratuuletettuun kattoon virtaava ilma siirtyisi suoraan katteen alle, olisi teoriassa mahdollista, että ulkoilman kosteus tiivistyisi rakenteeseen kylmän katteen alapintaan (kuva 59, marraskuu). Uratuuleutusta ei tule asettaa tämän perusteella aivan katteen alle. Uratuuleutuksesta on ohjeistettu, että sen tulee sijaita mahdollisimman lähellä eristyksen yläpintaa [15, s.53]. Pinnassa oleva uritus kuumenee kesällä kaikkein eniten ja lisää urituksen kuivatuskykyä.



Kuva 59. Ulkoilman kosteus ei tiivisty uratuuletettuun kattoon, sillä ulkoilman absoluuttinen kosteus ei ylitä lämmöneristeen kyllästyskosteutta. Vertailun vuoksi kuvassa on esitetty kyllästyskosteus katteen alla, joka alittaa ulkoilman kosteuden hetkellisesti marraskuussa.

Arvioidaan uratuuletuksen kykyä poistaa katosta kosteutta laskennallisesti. Oletetaan uran lämpötilaksi ja ulkoilman absoluuttiseksi kosteudeksi kenttätutkimuksessa heinä-marraskuussa 10 minuutin välein mitatut arvot ja ilman virtausnopeudeksi 0,01 - 0,30 m/s. Kullakin hetkellä laskettu kosteusvirran nopeus kerrotaan mittausvälin pituudella 600 s, jolloin saadaan mittavälillä siirtyvä kosteusmäärä. Mittausvälillä siirtyvät kosteusmäärät lasketaan yhteen, jolloin saadaan heinä-marraskuussa kuivuva kosteusmäärä. Tämä muutetaan vuoden aikana tapahtuvaksi kuivumismääräksi kertomalla heinä-

marraskuun arvo kertoimella 12/5. Laskenta huomioi täten voimakkaan kuivumisen kesällä, että alentuneen kuivumisen talvella. Tuuletusurien koko on $30 \times 20 \text{ mm}^2$ ja määrä 4,5 kpl metrille jaolla k220. Tuuletusaukkojen välinen etäisyys on 10, 20 tai 30 metriä. Kuvassa 55 on esitetty uratuuletuksen laskennallinen kyky poistaa katosta kosteutta vuoden aikana kaavan 26 mukaisesti.



Kuva 60. Uratuulettun PVC-katon kuivumiskyky vuodessa riippuu uran virtausnopeudesta (vaaka-akseli), kokoojakanavien etäisyydestä I_{KK} (eri käyrät), ulkoilman kosteudesta ja auringon säteilyn määrästä.

Tuuletusuritus lämmöneristeessä nostaa PVC-katon vuosittaista kuivumiskykyä merkittävästi verrattuna umpinaiseen PVC-kattoon. Uritettu rakenne poistaa kosteutta 1 - 8 kiloa katoneliöltä. Suurin laskennallinen kosteudenpoistokyky on luokkaa $16 \text{ kg/m}^2/\text{a}$. Jos uran keskimääräiseksi nopeudeksi arvioi 0,05 m/s, kuivatuskyky on luokkaa $1,5 \text{ kg/m}^2$, kun kokoojakanavien välinen etäisyys on 20 m (kuva 60). Kuivumismäärän arvioinnissa tulee huomioida, että virtausnopeus 0,05 m/s on keskimääräinen nopeus kirjallisuuden perusteella, eikä näin liioittele kuivumisen nopeutta. Urien pinta-ala 2700 mm^2 , urituksella $20 \times 30 \text{ mm}^2$ k220, vastaa käytössä olevia urien pinta-aloja 3000 - 4000 mm^2 .

Jos rakennuksen tilavuus on suuri tai sisäilma on hyvin kosteaa, tulee käyttää lyhyempää tuuletusväliä I_{KK} , luokkaa 10 - 15 m [8, s.19]. Alipainetuulettimien asennusväli kokoojakanavassa ei vaikuta laskennassa kosteusvirtoihin. Asennusvälin tulee olla enintään 10 m [15, s.54].

Uran lämpötilasta ei aiheudu merkittävää virhettä kuivumislaskentaan, vaikka rakennuksen sisälämpötila oli tarkasteluaikana ulkolämpötilassa, sillä suurin kuivumiskyky aiheutuu auringonpaisteesta. Tuloksia arvioitaessa on huomioitava, että ulkoilman absoluuttinen kosteus kenttämittauksessa oli hieman korkeampi kuin Suomessa keskimäärin

(kuva 13). Tällöin laskenta antaa kuivumiskyvylle alarajan, mikä saattaa vastata todellista kuivatuskykyä lähitulevaisuudessa [2].

Tuulen nopeus oli 37 mittauspäivänä ajanjaksolla 17.6–23.9 keskimäärin 0,7 - 1,5 m/s, joten tuulen nopeus oli alempi kuin mitä alueella keskimäärin, 2 m/s [34]. Nopeutta mitattiin pisteen 6 läheisyydestä. Rakennuksen geometria muodostaa tutkimusalueille katvealueen, missä tuulen nopeus on alempi kuin muulla alueella. Uratuuletuksen toimivuus ei kuitenkaan heikentynyt tästä, mikä johtuu osaltaan siitä että tuuletus perustuu savupiippu- ja pumppausvaikutukseen eikä tuuleen. Tuulen nopeuden lisäksi mitattiin tuulen suuntaa. Suunta vaihteli voimakkaasti, mikä viittaa virtauksen pyörteisyyteen.

Kenttätutkimuksessa ei esiintynyt (kuva 44) ulkoilman kovia pakkasolosuhteita, jotka kasvattavat kattoon virtaavan ulkoilman tiivistymismahdollisuutta. Kappaleessa 7 on tarkasteltu laskennallisesti kosteuden tiivistymismahdollisuutta uratuuleuksesta kylmällä ulkoilmalla.

Keväällä katteen lämpötila on nollan tuntumassa, kun katon päällä oleva lumi sulaa vähitellen. Ulkoilman lämpötila kohoaa katteen lämpötilaa nopeammin, jolloin voi esiintyä niin sanottu kevätkondenssi. Kevätkondenssi tarkoittaa tilannetta, missä kattoon siirtyvä ulkoilma kondensoituu katteen alle. Säätilastojen perusteella lumen sulaminen kestää ainakin 1 - 2 viikkoa [45], jona aikana kevätkondenssi on mahdollinen. Uratuuletuksen kondenssiherkkyys riippuu myös paikkakunnasta taulukon 21 mukaan. Taulukossa ulkoilman lämpötila on laskettu hetkelle viikkoa ennen lumipeitteen häviämistä (taulukon vasen sarake), jotta arvo kuvaa kondenssialttiutta keskimäärin lumen sulamisaikana.

Taulukko 21. Lumen sulamisen ajankohta vaikuttaa uratuuletuksen aiheuttamaan kondenssin todennäköisyyteen. Taulukon paikkakunnista Sodankylässä kevätkondenssia esiintyy todennäköisimmin. Taulukossa ei ole huomioitu sitä että lumi saattaa sulaa katoilta eri aikaan kuin maasta, mihin puolestaan tilastot perustuvat.

Paikkakunta	Pysyvän lumipeitteen häviäminen keskimäärin 1971–2000 [46]	Ulkolämpötila T_u sulamisaikana 1961–1990 [15, s.37]
Helsinki	27.3	-1,9 °C
Jyväskylä	22.4	1,3 °C
Sodankylä	16.5	3,6 °C

Kenttätutkimus ei sisällä kevätajan mittauksia, mutta yön vastasäteilyn vaikutuksesta katteen lämpötila on alle ulkoilman lämpötilan läpi vuoden. Mittauksissa ei ole havaittu ulkoilman kosteuden kondensoitumista uratuuletetussa tutkimusalueessa.

Uratuuletuksen kuljettama lämpöteho ja yläpohjan läpi johtuva lämpövirta talvella on laskettu yksinkertaistetusti taulukossa 22. Uratuuletuksen kuljettaman lämpöteho on vähäinen, 1,5 % johtumishäviöstä (0,042/2,79), mikä vastaa aiemmin esitettyjä arvioita [15 & 16 & 12]. Uran sijainti eristeessä tulee suunnitella niin kosteus- kuin lämpötekniisesti hyväksyttäväksi. Tuuletusuran päällisen eristeen paksuuden suurentaminen lisää energiankulutusta [12, s.22]. Uravirtauksen vaikutus lämmönkulutukseen keskittyy lähinnä virtauksen alkupäähän noin metrin alueelle (liite 1).

Taulukko 22. Uravirtauksen ja yläpohjan lämpöhäviön vertailu talvella.

Ulkolämpötila	-10 °C	<u>Lämpöhäviö uratuuletuksella:</u>	
Sisälämpötila	21 °C	Virtausnopeus urassa	0,05 m/s
Lämpötila uran korkeudella 60 mm katteesta	-5,35 °C	Urien pinta-ala metrin leveydellä 4,5*0,02*0,03 m ²	0,0027 m ²
Uraan virtaavan ilman lämpötilamuutos	4,65 K	Tilavuusvirta urassa	0,000135
<u>Johtuminen:</u>		Ilman tiheys (T= -10 °C)	1,34 kg/m ³
Yläpohjan U-arvo U _{yp}	0,09 W/mK	Ilman ominaislämpökapasiteetti	1004 J/kgK
Johtumishäviön lämpötilaero dT	31 K	kokoojakanavien välinen etäisyys	20 m
Johtumishäviöteho U _{yp} *dT	2,79 W	Konvektiohäviö (q _v *p*c*dT _{ura}) / I _{KK}	0,042 W

Uran lämpötilaan vaikuttaa uran yläpuolisen lämmöneristeen lisäksi PVC-katteen väri, siten että tummempi kate nostaa uran lämpötilaa, ja siten sen kuivatuskykyä. Pohjoismaissa, missä uratuuletus on tärkeä katon kuivumisen kannalta, on perusteltua käyttää tummaa PVC-katetta. Se ei lisää jäähdytystarvetta merkittävästi Pohjoismaissa. Vaalean katteen käyttö voi olla kuitenkin perusteltua, jos halutaan vähentää kosteudenliikkeitä lämmöneristeessä.

Aiemmissa tutkimuksissa esitellyssä kupolikaton tapauksessa uratuuletus aiheutti kosteuden valumista rakennuksen sisätilaan. Suurin osa PVC-katoista on kuitenkin loivia, jolloin esitettyä ongelmatilannetta ei yleensä synny. Tutkimuksessa tehdyssä kenttäkokeessa uratuuletus toimi ongelmitta, eikä kokoojakanavistossa tai lämmöneristeessä havaittu tiivistynyttä kosteutta ulkoilmasta. Kuvassa 61 on esitetty kuva kokoojakanavasta uratuuletetussa PVC-katossa 12.12.2011 ja 9.1.2012. Tammikuussa 2012 alipainetuulettimesta oli siirtynyt pieni määrä lunta lämmöneristeen pinnalle.



Kuva 61. Kuva tutkimusalueen 3 kokoojakanavan alipainetuulettimesta. Kivivilla oli täysin kuivaa 12.12.2011. Kokoojakanavan alipainetuulettimen sisäpinta on jäänyt, ja alipainetuulettimen kautta on siirtynyt pieni määrä lunta kattoon 9.1.2012.

Tuuletusurituksen käyttämistä kylmissä rakennuksissa on käsitelty kappaleessa 3.3.

Tarkastellaan uratuuletuksen ja lämmöneristeen huokosissa tapahtuvat tuuletuksen virtausmääriä. Taulukossa 23 on esitetty yksinkertaistettu laskenta alueen 1 lämmöneristeen huokosissa tapahtuvan ilmavirtauksen suuruudesta verrattuna uratuuletetun alueen tuuletusurien ilmavirtaukseen. Huokosvirtauksen laskennassa on oletettu, että virtaus tapahtuu 50 mm syvyyteen asti katteen alapuolella, virtaavan ilman lämpötila on 20 °C ja paine ero alipainetuulettimien välillä on 1 Pa tai 10 Pa. Uravirtaus on laskettu jo aiemmin esitetyillä parametreilla alueen 1 leveydelle.

Taulukko 23. Uratuuletuksen ja huokosvirtauksen tilavuusvirtojen vertailu.

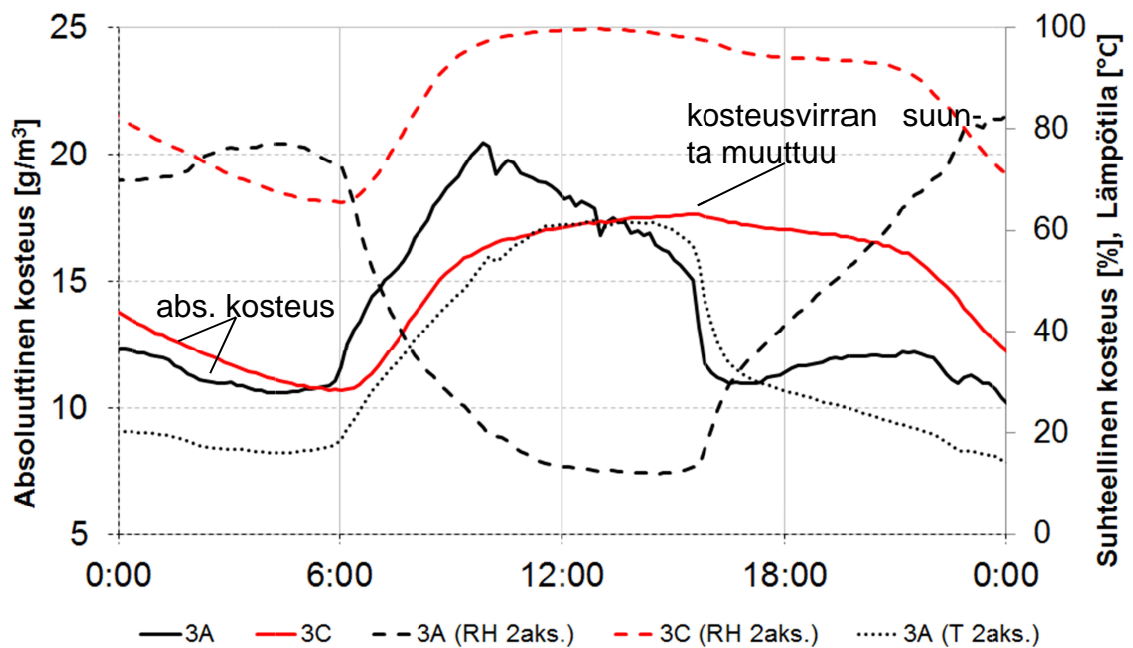
<u>Virtaus huokosissa</u>				
Virtauksen poikkipinta-ala, alue 1, villan yläpinnassa 7,1 m x 50 mm				0,355 m ²
Kivivillan permeabiliteetti k [19, s.490]				1,25E-09 m ²
Ilman keskimääräinen dynaaminen viskositeetti, 20 °C				1,80E-05 Ns/m ²
Virtausmatka L, alueen 1 alipainetuulettimien välinen etäisyys				13,6 m
paine-ero alipainetuulettimien välillä, arvio				1 tai 10 Pa
Tilavuusvirta, kaava 18				0,0000018-0,000018 m ³ /s
<u>Virtaus urissa</u>				
Virtauksen poikkipinta-ala 7,1 m x 0,02 m x 0,03 m x 4,5 1/m				0,01917 m ²
Virtausnopeus				0,01 tai 0,1 m/s
Tilavuusvirta				0,00019-0,0019 m ³ /s
<u>q_{vura}/q_{vhuok}</u>				
dp	1Pa	v _{ura}	0,01 m/s	106
dp	1Pa	v _{ura}	0,1 m/s	1058
dp	10Pa	v _{ura}	0,01 m/s	11
dp	10Pa	v _{ura}	0,1 m/s	106

Taulukon 23 mukaan uratuuletuksella virtaa 11 - 1058 kertaa enemmän ilmaa kuin huokosissa tapahtuvassa virtauksessa. Paine-ero alipainetuulettimien välillä on todennäköisesti lähempänä 1 Pascalia, joten voidaan arvioida, että uratuuletus on vähintään 100 kertaa tehokkaampaa kuin huokosvirtaus.

6.3.3 Kosteuden siirtyminen pystysuunnassa

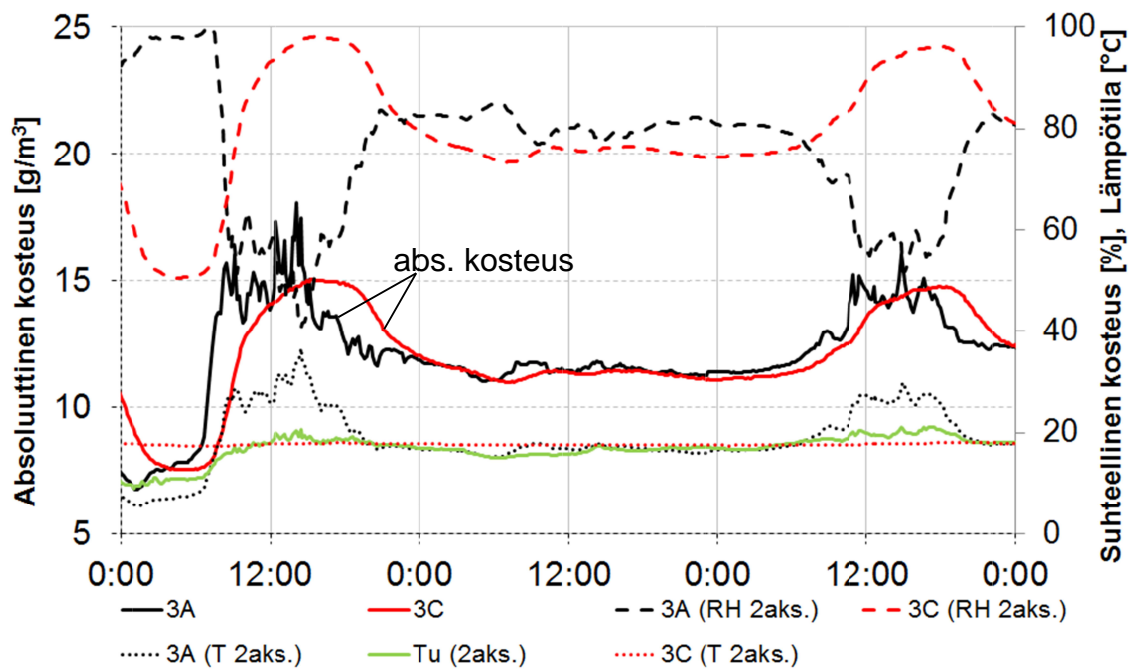
Kuvassa 62 on esitetty lämpötila, absoluuttinen kosteus ja suhteellinen kosteus 2.7.2011 alueella 1. Kosteuspitoisuus eri korkeuksilla on suhteellisen tasainen, mutta aurinkoisina päivinä kosteuspitoisuuksissa tapahtuu voimakas muutos. Tällöin eristeen yläosan ja alaosan välillä tapahtuu kosteudensiirtymistä. Kosteuspitoisuuksien muutosnopeuksista voidaan päätellä, että eri kohdissa lämmöneristettä tapahtuu eri kosteudensiirtoilmiöitä.

Auringossa lämpenevä mineraalivilla luovuttaa huokosilmaan kosteutta, koska eristeen huokosilman suhteellinen kosteus laskee, mikä puolestaan laskee eristeen hygroskoopista tasapainokosteutta. Lisäksi kuumaksi lämmennyt mineraalivilla ei enää käyttäydy 23 °C:ssa mitatun hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän mukaisesti. Tilanteessa hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä siirtyy alemmaksi. Lämmöneristeen yläosan noin kaksinkertaistunut vesihöyryn osapaine saa aikaan kosteudensiirtymisen katon alaosaan pisteeseen C yhtälön 7 mukaisesti. Pisteeseen C kosteus seuraa pisteen A kosteutta viiveellä, joka on riippuvainen kosteuden diffuusionopeudesta. Alaosan vesihöyryn pitoisuus ei nouse pinnan tasolle, ja auringon säteilyn heikentyessä iltaa kohden, alkaa yläosien villa sitoa enemmän kosteutta lämpötilan laskiessa (suhteellisen kosteuden noustessa) ja kosteuspitoisuus alenee tasolle, joka vallitsi ennen auringon paistetta. C pisteen korkea kosteuspitoisuus alkaa diffusoitua ylöspäin, jolloin myös pisteen C kosteuspitoisuus laskee. Tämä tapahtuu kuitenkin hitaammin, koska diffuusio on hitaampaa kuin hygroskooppisesti tapahtuva kosteuden sitoutuminen tai vapautuminen. Mitä nopeammin ja lyhyemmän aikaa auringon säteily osuu pinnalle, sitä suuremmaksi muodostuu pisteiden A ja C välinen absoluuttisen kosteuden ero. Pinnan lämpötilan noustessa hieman ulkoilmaa korkeammaksi pilvisinä päivinä, pisteiden A ja C välillä ei ole suurta kosteuspitoisuuden eroa. Pilvisinä päivinäkin pisteiden A ja C absoluuttisissa kosteuspitoisuuksissa tapahtuu pieniä muutoksia lämmöneristeen lämpötilan muuttuessa ulkoilman lämpötilan mukaan.



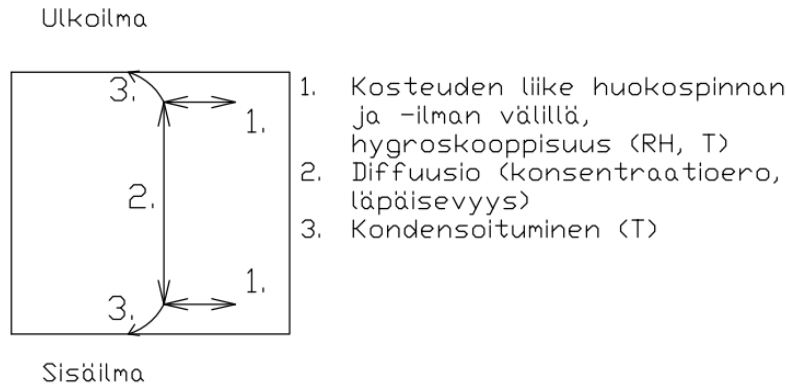
Kuva 62. Aurinkoisina kesäpäivinä kosteus liikkuu lämmöneristeen ylä- ja alapinnan välillä.

Kuvassa 63 on esitetty absoluuttinen kosteus, suhteellinen kosteus ja lämpötila pisteessä 3 ajalla 14.–16.8.2011. 15.8 taivas oli pilvinen ja katteen lämpötila ei eronnut ulkoilman lämpötilasta. Tällöin kosteus ei liiku pystysuunnassa, vaan lämmöneristeessä vallitsee huokosilman kosteuden tasapaino. Pilvisen päivän edellinen ja jälkeinen päivä olivat puolipilvisiä ja katteen lämpötila nousi 30 - 35 $^{\circ}\text{C}$:een. Tällöin ei esiintynyt yhtä voimakkaita kosteudenliikkeitä kuin kuvassa 62.



Kuva 63. Pilvisenä päivänä 15.8 (keskimmäinen päivä kuvassa) kosteus ei liiku lämmöneristeessä. Tällöin suhteellisen kosteuden ero pisteen A ja C välillä johtuu lämpötilaerosta pisteiden välillä.

Kuvassa 64 on esitetty kuvaus kosteuden siirtymisestä lämmöneristeiden sisällä. Lyhyellä tarkasteluvälillä (päivä) voidaan unohtaa kosteuden diffuusio katteen läpi ulkoilmaan. Lisäksi tiiviin höyrynsulun läpi ei tapahdu kosteudensiirtymistä. Tällöin kosteus siirtyy eristeessä sen huokosilman ja huokospinnan välillä sekä diffuusiolla eristeiden yläosan ja alaosan välillä. Kuvassa 62 pisteen 3C absoluuttinen kosteuspitoisuus muuttuu pehmeästi, mikä viittaa diffuusiolla tapahtuvaan kosteudensiirtymiseen. Lisäksi 3C pisteen lämpötila on tasainen, jolloin lämpötila muutos ei voi vaikuttaa pisteen lämmöneristeiden hygroskooppisuuteen. Höyrynsulun päällä suhteellinen kosteus voi nousta 100 %:iin, jolloin kosteus tiivistyy pinnalle. Pisteen 3C absoluuttisen kosteuden kuvaajan muoto (kuva 62, terävä kulma klo 16) saattaa viitata kosteusvirran suunnan muutokseen tiettyä ajanhetkenä. Pisteen 3A absoluuttinen kosteus seuraa pisteen lämpötilaa, joten kosteuden voimakas lasku auringon säteilyn loputtua viittaa kosteuden siirtyvän viilenevän eristeiden huokospinnalle.



Kuva 64. Kosteuden liike lämmöneristeessä, kun konvektiovirtauksia ei huomioida. Suluissa tekijä, joka vaikuttaa ilmiöön. Talvella kosteudensiirtyminen eristeessä on vähäistä, sillä suurin osa kosteudesta on hygroskooppisesti sitoutuneena lämmöneristeiden yläosassa ja jäätyneenä katteen alapinnassa eikä kattoon kohdistu voimakasta auringon säteilyä.

Kuvan 64 mukaista kondensoitumista on käsitelty kappaleessa 6.3.5. Kosteuden pystysuoraa liikettä solumuovilla eristetyssä katossa on käsitelty kappaleessa 7.3.

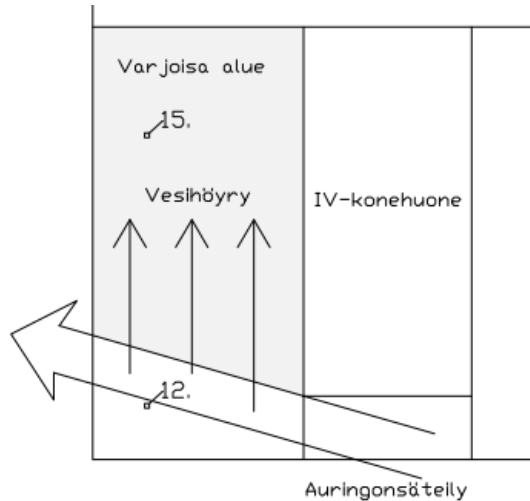
Kosteuden pystysuoraan liikkeeseen vaikuttaa myös rakenteessa tapahtuvat ilmavirtaukset. Kappaleessa 6.3.1 todettiin, että tuulettamaton katto tasasi kosteutta tehokkaammin kuin pelkillä alipainetuulettimilla tuuletettu katto. Toisin sanoen PVC-katteen hulmuaminen siirtää kosteutta tehokkaimmin tuulettamattomassa katossa. Tämä johtuu osittain siitä, että hulmuaminen aiheuttaa tuulettamattomassa katossa ilmavirtauksia lämmöneristeiden alaosista ylöspäin. Alipainetuulettimilla varustetussa katossa hulmuamisen aiheuttama paine-ero tasaantuu alipainetuulettimien välityksellä ulkoilmaan, jolloin ilmanvirtaukset lämmöneristeiden alaosista jäävät vähäisiksi. Vastaava paineen tasaantuminen tuuletusratkaisusta riippuen esiintyy todennäköisesti myös pumppausvaikutuksessa. Tämän perusteella PVC-katon tuuletus pelkillä alipainetuulettimilla ei ole järkevää.

6.3.4 Kosteuden siirtyminen vaakasuunnassa

Tutkimusalueen 4 tuloksien perusteella (liite 2, kuva 2D) katoissa tapahtuu sivusuuntaista kosteuden liikettä lämmöneristeiden sisällä. Lämmöneristeiden kosteus kerääntyi 4 kuukauden aikana alueen 4 yläosiin, mutta tämä saattoi tapahtua nopeamminkin. Tutkimusalue 4 sijaitsee viereiseen ilmanvaihtokonehuoneeseen nähden siten, että osa alueesta 4 on varjossa hetkellä, jolloin alueen alaosaan paistaa aurinko. Tällöin piste 12A lämpiää nopeammin kuin piste 15A. Kuvassa 47 on esitetty alueen 4 eri kohtien lämpötilan kohoamisen eriaikaisuus.

Pisteessä 12A vesihöyryn osapaine nousee korkeaksi, ja jos samaan aikaan on tuulista, eristeiden päällä olevan PVC-katteen hulmuaminen saa aikaan kosteuskonvektion alueen 4 yläosiin, kuten kuvassa 65 on esitetty. Kosteus siirtyy myös diffuusiolla katteen alla ja lämmöneristeiden huokosilmassa. Myös pumppausvaikutus lisää kosteudensiirtymistä, mutta vaikutus lienee pieni, sillä ylipaine tasaantuu varjoisan alueen lämmöneristeeseen. Hetkellisestä kylmemmässä pisteessä 15A ilma ei pysty pitämään siirtyvää vesihöyryä

höyrymuodossa, vaan se tiivistyy eristeen ja katteen pinnoille. Tällaisessa tilanteessa on tärkeää, että katon höyrysulku on vesitiivis, sillä muutoin kosteuden kerääntyminen tietylle alueelle voi aiheuttaa kondenssiongelmia ja vesivalumia alapuolisiin tiloihin. Tilanne voi syntyä, vaikka katon rakennuskosteuden määrä olisi alhainen.



Kuva 65. Auringon säteily voi siirtää kosteutta katon sisällä, jos osa katosta on varjoisella alueella.

28.12.2011 Havaittiin, että pisteen 15 läheisessä asennusalipainetuulettimessa villa oli pinnasta kosteaa, kun taas pisteen 12 läheisessä asennusalipainetuulettimessa villa oli pinnasta kuivaa. Mittauksien perusteella pisteessä 12 villa oli myös pohjasta kuivaa. Nämä havainnot ja tulokset viittaavat siihen, ettei katvealueelle siirtyneen kosteuden tasaantuminen tapahdu nopeasti. Ilman kokonaispaine-eron mittaaminen aurinkoisen ja varjoisen alueen välillä saattaisi antaa lisätietoa auringonsäteilyn ja tuulen aikaansaamasta kosteudenliikkeestä katon sivusuunnassa.

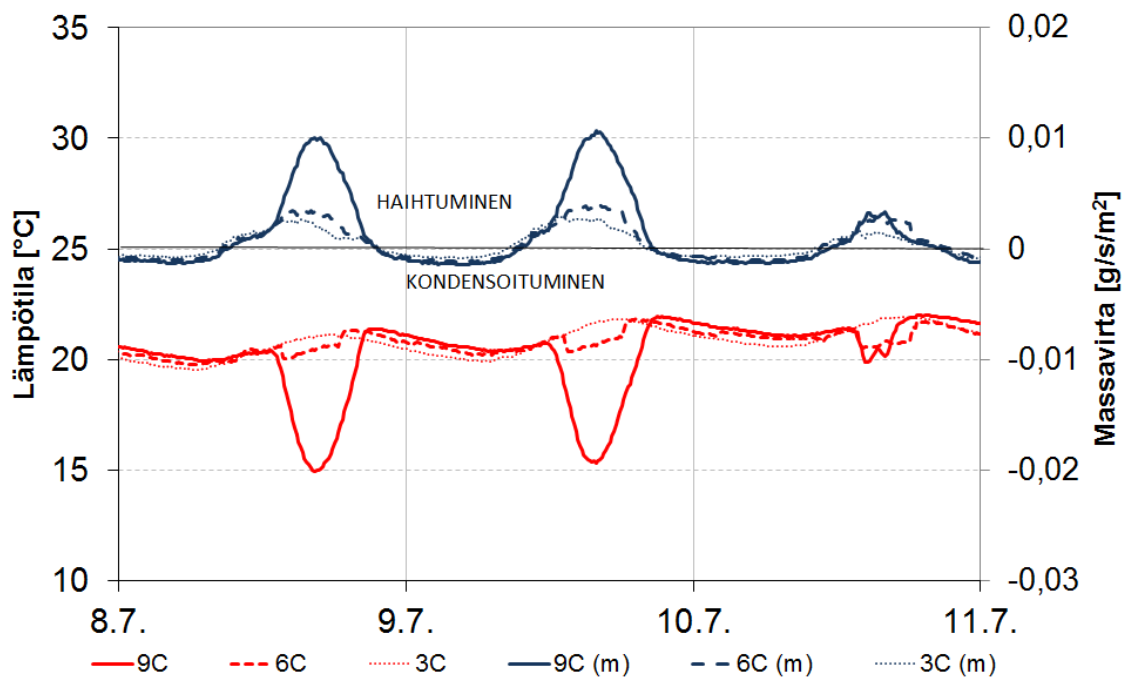
Varjoisan alueen tuulettaminen saattaa parantaa katon kosteusteknistä toimintaa, mikäli katon höyrysulku on ilmatiivis. Tämä voidaan toteuttaa vain varjoisalle alueelle sijoituilla alipainetuulettimilla, jotka poistavat alueelta kerääntyneitä kosteutta. Tällaisen ratkaisun tehostaminen varjoisan alueen uratuuletuksella voi tulla kyseeseen.

Kuvatussa ilmiössä kosteus kerääntyy katon tietylle alueelle lämpötilaeron vaikutuksesta. Kosteus ei siirry loivalla katolla tällä tapaa, jos katolla ei ole varjoisia alueita. Kuitenkin katon alapuoliset lämpökuormat (kuva 4) voivat loivalla katolla johtaa vastaavaan kosteudensiirtymiseen. Alapuolisia lämpökuormia voidaan estää termistä massaa omaavalla kantavalla rakenteella, esimerkiksi betonisella laatalla, jos lämpökuorma vaihtelee ajallisesti. Lämpötilaero katon alueiden välillä voi syntyä myös, jos katon kaltevuus muuttuu ja auringonpaiste vaikuttaa eri teholla kattoalueille. Katolla paikallisesti oleva lumi voimistaa lämpötilaerojen syntymistä (kuva 5). Solumuovisella lämmöneristeellä voidaan vähentää kosteudensiirtymistä ja vaalealla PVC-kermillä katon lämpiämistä. Myös katteen kiinnitystiheys ja löysyys vaikuttavat hulmuamisilmiön voimakkuuteen, ja sen aiheuttamaan kosteudensiirtymiseen. Jos kosteudensiirtymistä ei voida estää, voi toimivin ratkaisu kaltevilla katoilla olla tuulettamaton katto.

Kosteudensiirtyminen lämpökuormien vaikutuksesta tulee huomioida myös muissa rakenteissa, kuten seinissä ja alapohjissa. Kosteudensiirtymisen voimakkuuden arvioinnissa on huomioitava edellä mainittujen tekijöiden lisäksi rakenteen eri kerroksien ilmanläpäisevyys ja vesihöyrynläpäisevyys sekä koko rakenteen sisällä tapahtuvat ilman liikkeet, esimerkiksi uratuuletuksen vaikutus. Esimerkiksi solumuovieristetyssä sandwich-elementissä auringonsäteilyn vaikutus on pienempi kuin mitä alueella 4 todettiin.

6.3.5 Kosteuden kondensoituminen ja haihtuminen

Alueen 3 pisteen 9C lämpötilan selvä aleneminen aurinkoisena aikana viittaa kosteuden haihtumiseen pisteen 9C läheiseltä pinnalta eli höyrynsulun päältä. Myös alueella 2 pisteessä 6C havaittiin kosteuden haihtumista (ei havaittu 2.–4.7), sillä pisteen lämpötila aleni aurinkoisella säällä keskipäivällä. Kuvaan 66 on laskettu kosteusvirta pinnan ja eristeen huokosilman välillä kaavalla 24 aikavälillä 8.–10.7. Alueella 3 kosteuden haihtuminen on selvästi suurinta, mikä viittaa siihen, että alueella kosteuden siirtyminen lämmöneristeessä on tehokkainta. Tämä parantaa uratuuletetun katon kuivumiskykyä. Alueella 2 kosteuden siirtyminen on tehokkaampaa kuin alueella 1, sillä alue 2 on isompi ja kosteus tasaantuu lämmöneristeessä PVC-kermin hulmutessa tuulen vaikutuksesta.



Kuva 66. Laskennallisesti voidaan havaita kosteuden haihtuminen pisteen C läheisyydessä. M = kosteuden haihtuminen tai kondensoituminen [g/s/m²]. Massavirrassa ei ole huomioitu kosteuden sitoutumista eristeeseen.

Alueella 3 haihtumista tapahtui pääasiassa heinäkuussa ja myöhemmin elo-syyskuussa, milloin haihtuminen oli vähäisempää kuin heinäkuussa. Alueella 2 haihtumista tapahtui läpi kesän lokakuun puoliväliin asti. Alue 3 kuivui nopeammin ja sen haihtuminen lop-

pui jo ennen kuin kosteuden sitoutuminen eristeeseen, ja kondensoituminen sekä jäätyminen eristeen yläosassa vaikutti syksyllä ilmiöön. Ulkoilman kylmeneminen lopetti haihtumisen alueella 2 lokakuussa.

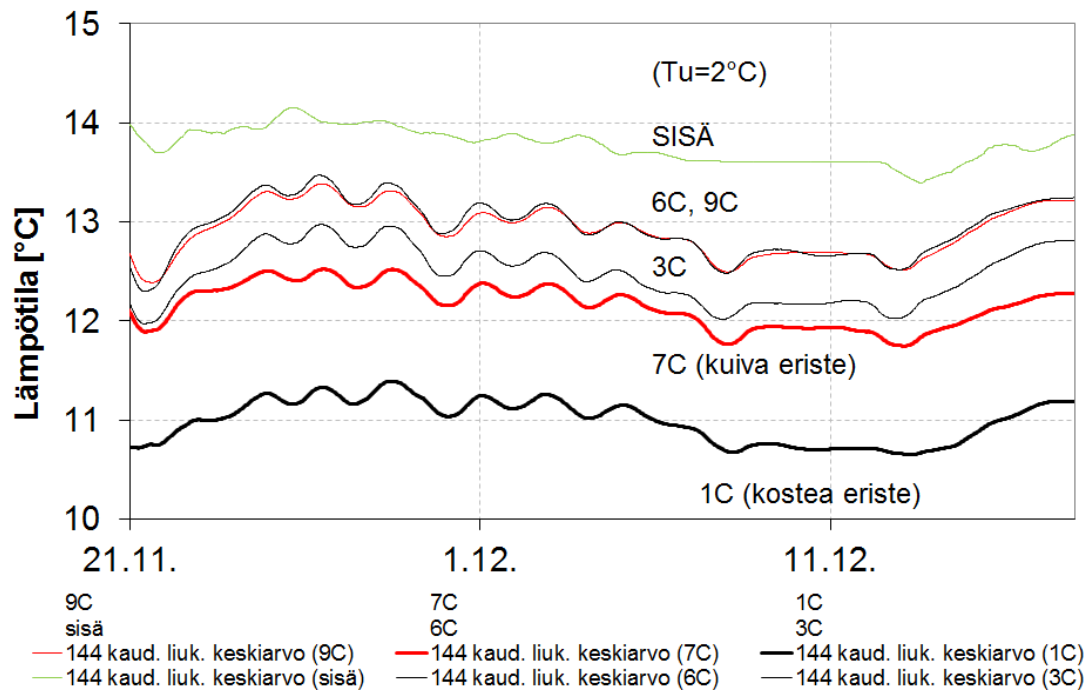
Alueella 1 ei havaittu lämpötilan laskua aurinkoisella säällä. Alueen 1 pisteessä 3 ei tapahdu kosteuden kondensoitumista tai haihtumista lämmöneristeen ja höyrynsulun välillä. Kohdan keskimääräinen suhteellinen kosteus on ennen auringonsäteilyä reilu 70 %, kun alueella 3 pisteessä 9 suhteellinen kosteus oli vajaa 50 %. Tämä tarkoittaa, että alueella 1 lämmöneriste sitoo paremmin (hygroσκοoppisuus kasvaa suhteellisen kosteuden mukana) pystysuunnassa liikkuvan kosteuden kuin alueella 3. Alun perin kuiva lämmöneriste alueella 3 ei pysty sitomaan nopeasti siirtyvää kosteutta.

Alueella 3 pisteessä 8 ei havaittu kosteuden haihtumista pisteen C läheisyydessä. Tämä viittaa siihen, että tarkasteluaikana kosteus ei ollut täysin tasaantunut lämmöneristeessä.

Kosteuden pystysuoraan liikkeeseen liittyvä kondensoitumisilmiö ei lisää rakenteen kosteus määrää ja ei näin ole vahingollinen katolle kunhan tiivistyminen ei aiheuta veden valumista alapuoliseen tilaan.

6.3.6 Kosteus katon jiireissä ja katon lämmöneristävyys

Tutkimusalueiden 1 ja 2 jiireissä havaittiin koko mittausajan korkeita suhteellisia kosteuksia. Jiirien kaadot kattokaivoihin oli toteutettu EPS-kiiloilla, joiden kosteudenläpäisyvastus on noin 7-kertainen kivivillaan verrattuna (50 mm EPS ja 230 mm kivivil-la). Eriste oli alueilla 1 ja 2 jiirissä kostea aina syksyyn asti, kunnes kosteus alkoi siirtyä ylemmäs eristeessä. Kuvassa 67 on esitetty mitattuja lämpötiloja kantavan rakenteen päältä katon jiiristä (1C ja 7C) ja 7 - 8 m päästä jiiristä (3C, 6C ja 9C). Jiirissä pisteen C lämpötila on selvästi alempi kuin muualla katossa. 11.12 pisteen 1C lämpötila oli 10,7 °C, kun se olisi laskennallisesti 13,0 °C. Laskettu arvo on saatu hetkellisistä mittaustuloksista ja teoreettisista lämmönvastuksista (ontelolaatta oletettu umpinaiseksi). Alhainen lämpötila viittaa rakenteen alentuneeseen lämmöneristävyyteen. Kuivissakaan katon C pisteissä lämpötila ei ole 13 °C, vaan aina esiintyy konvektio virtauksia, jotka pudottavat eristävyyttä. Jiirissä oleva kevytsora ja siinä tapahtuvat ilmapirtaukset saattavat osaltaan laskea lämpötilaa pisteessä 7C.



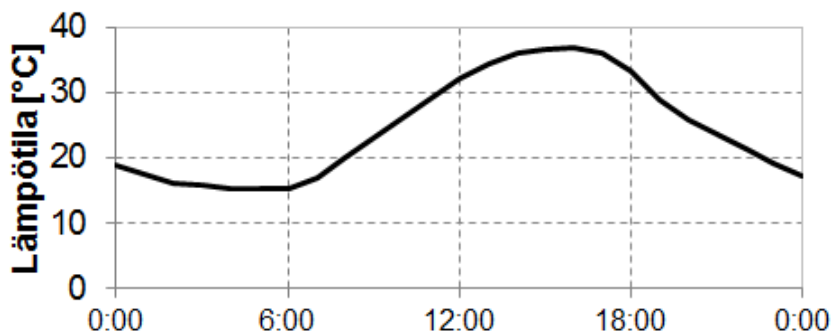
Kuva 67. Marras-joulukuussa mitattuja lämpötiloja alueilta 1 - 3. Lämpötilat osoittavat, että eristeen lämmönjohtavuus kasvaa kosteus määrän mukana.

Katon lämmöneristävyyden kannalta on varmistettava, ettei katon hygrooskooppisen määrän ylittävä kosteus siirry gravitaatiolla jiiriin tai poistettava kosteus jiiristä. Kuvan 67 tuloksien arvioinnissa on huomioitava, että korkeat kosteus määrät jiirissä saattavat vaikuttaa mittapään lämpötila-anturin antamaan lukemaan. Toisaalta lämpötila-anturin toimimattomuus näkyy 100 % kosteudessa yleensä kymmenien asteiden heittona.

Kappaleessa 4.3 todettiin, että lämmöneristeen lämmöneristävyys alenee vain kapillaarialueen kosteus määrällä. Jiirialueen lämmöneristävyys paranee rakenteen kuivuessa ja jiirin suhteellisen kosteuden alentuessa alle 100 %:iin. Tämän voi olettaa tapahtuvan vuoden 2012 aikana, sillä rakennuskosteus $0,350 \text{ kg/m}^2$ kuivuu rakenteesta noin 18 kuukauden aikana taulukon 13 perusteella.

6.3.7 Pumppausvaikutus

Lämmöneristeen keskimääräinen lämpötila nousee kuvan 68 perusteella 20°C pinnan lämpötilan noustessa 61°C lämpötilaan. Katteen yllä lämpötila oli suurimmillaan 35°C . Taulukon 13 perusteella lämmöneristeen huokosilman tilavuudenmuutos on kyseisenä päivänä noin 7 %. Pumppausvaikutukseen ei vaikuta hetkittäinen pilvisyys, sillä katon lämpötila ei laske tänä aikana.



Kuva 68. Kivivillan keskimääräinen lämpötila aurinkoisena päivänä 29.6 muuttuu 20 °C, kun pinnan lämpötila nousee 61 °C:een.

Pumppausvaikutus aikaansaa ilman liikkeen ulos katosta ja sisään kattoon. Riippuen ympäröivän ilman kosteusmäärästä vaikutus kastelee tai kuivattaa kattoa. Pumppausvaikutus voi aiheuttaa ilmavirtauksia lämmöneristeen ja sisäilman välillä, jos höyrynsulku ei ole ilmatiivis. Tästä syystä myös sisäilman kosteus voi siirtyä pumppausvaikutuksella kattoon.

Kuvan 68 mukaisena päivänä lämmöneristeen yläosan absoluuttinen kosteus oli 5 g/m³ korkeampi kuin ulkoilman. Jos olettaa lämmöneristeen paksuudeksi 230 mm, niin katoneliön lämmöneristeen tilavuus on 0,23 m³. Pumppausvaikutus kuljettaa kosteutta yhden päivän aikana 0,081 g (0,07*0,23 m³*5 g/m³). Yhden kesän aikana kosteus määrä on alle 10 g/katto-m². Tulos vastaa kirjallisuudessa esitettyä arvoa 1,5g/m² kuukaudessa [14, s.58].

Pumppausvaikutuksen suuruus riippuu lämmöneristeen paksuudesta siten, että mitä ohuempi eriste, sitä suurempi vaikutus on. Nykyiset eristepaksuudet ovat niin korkeita, että pumppausvaikutuksella siirtyvät kosteusmäärät ovat pieniä.

6.3.8 PVC-kattojen kosteusmittaus

Kosteuden luotettava mittaaminen PVC-katoista on vaikeaa. Tämä johtuu kosteuden nopeasta liikkeestä katossa. Mitä pidempi mittausjakso ja suurempi mittapisteen määrä, sitä todennäköisemmin mittauksesta voidaan tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Mittapisteen tulee sijaita jokaisella katon osalla, missä eriste on yhtenäinen ja kosteus pääsee liikkumaan sivusuunnassa. Mittapistettä tulee sijoittaa ensisijaisesti katon jiiriin, mutta myös auringonsäteilyn katvealueelle mikäli katolla on tällainen. Kenttätutkimuksessa todettiin, että kosteus siirtyy lämmöneristeen sisällä katon katvealueelle jopa jiirin yli. Lämpimillä tai kuumilla alueilla lämmöneristeen kosteuspitoisuus on alhainen ja kylmillä alueilla korkea. Mittauksissa on huomioitava, että jos niitä ei tehdä jiiristä, suhteellinen kosteus ei välttämättä ole lähelläkään 100 %:ia, vaikka jiirissä olisi vettä. Kosteuden mittaamisessa on käytettävä kalibroituja toimivia antureita. Mittaukset voidaan jakaa kertamittaukseen ja jatkuvaan mittaukseen.

Kosteuden kertamittaukset tulee erityisesti tehdä alueilla, joissa voidaan olettaa olevan suurin kosteuspitoisuus. Kertamittauksissa voidaan ottaa kertalukemat määräajoin esimerkiksi aamulla, päivällä ja illalla, ja tulosten perusteella arvioidaan kosteustilannetta. Käytännössä lukemat otetaan useimmiten vain yhdellä ajanhetkellä. Kertamittauksissa on huomioitava, että voimakkaalla auringonpaisteella mitta-anturin varsi on suojattava auringonpaisteelta. Muutoin lämmönjohtuminen rakenteeseen alentaa suhteellista kosteutta. Koska kertamittauksessa anturi asennetaan lämpötilagradientin suuntaisesti, tapahtuu mittauksissa aina jonkin suuruista mittausrvirhettä. Anturin asennus on aina tehtävä vesihöyry- ja ilmatiiviiksi. Kertamittauksissa tulee vesihöyrypitoisuuden tasaantua asentamisen jälkeen, mikä on PVC-katoissa kesällä ongelmallista lämmöneristeen vesihöyrypitoisuuden nopeiden muutoksien vuoksi. Nopeiden muutoksien vuoksi eri pisteistä luettavat mittaustulokset on otettava mahdollisimman samanaikaisesti, jotta tulosten vertaaminen on mahdollista.

Perusteellisessa ja helpommin tulkittavassa mittaamisessa käytetään jatkuvatoimista mittausta, joka kestää vähintään vuorokauden, mutta voi kestää jopa vuosia. Jatkuva-toimisetkin mittaukset on toteutettava huolellisesti, jottei synny mittausrvirheitä. Mittarit asennetaan kohtisuoraan lämpötilagradienttia vasten, joten mittausrvirhe on huomattavasti pienempi kuin kertamittauksessa. Jatkuvatoimisista mittauksista saadaan paljon tietoa rakenteen kosteusmäärän, mutta myös kosteudenliikkeiden arviointiin. Hyväksi havaittu jatkuvatoiminen mittausrjärjestely on esitetty kappaleessa 6.1.2.

Taulukossa 24 on esitetty kenttämittauksen alueiden 1 ja 3 perusteella PVC-katon suhteellinen kosteus kesällä ja talvella. Kesällä suhteellinen kosteus vaihtelee päivän aikana voimakkaasti. Huomattavaa on, että kuivasta ja kosteasta katosta voidaan kesällä keskipäivällä mitata vastaavia suhteellisia kosteuksia, mutta pilvisellä säällä tai yöllä kattojen suhteellisissa kosteuksissa on eroa. Tällöin kuivan katon suhteellinen kosteus katteen alla on luokkaa 35 - 50 % ja kostean 50 - 75 %. Erittäin kosteassa katossa, esimerkiksi jos kosteus on kerääntynyt katon varjoisalle alueelle, suhteelliset kosteudet ovat hyvin korkeat koko lämmöneristeen korkeudella myös päivällä tapahtuvassa mittauksessa (liite 2, kuva 2K). Tällaisella alueella katteen alapuolinen suhteellinen kosteus kuitenkin laskee auringonpaisteella selvästi 100 %:sta, mutta höyrynsulun päällä suhteellinen kosteus ei laske 100 %:sta pilvisellä säällä tai yöllä.

Erittäin kuivassa PVC-katossa voidaan mitata talvella hieman alle 100 % suhteellisia kosteuksia katteen alta. Tällaisen tuloksen tulkintaa vaikeuttaa mitta-anturien tarkkuuden heikkeneminen kyseisellä kosteusalueella. Erittäin kosteassa katossa höyrynsulun päällinen suhteellinen kosteus on marraskuussa luokkaa 70 % ja kuivassa katossa 60 %. Talvella tehtävässä kosteusmittauksessa tulee huomioida, että suuri osa kosteudesta on kondensoitunut ja jäänyt katon yläosiin, jolloin mitattavat suhteelliset kosteudet ovat lähellä toisiaan riippumatta katon kosteusmäärästä. Tällöin katon kosteuden mittaaminen suhteellisen kosteuden mitta-antureilla ei ole suositeltavaa, vaan parempi keino on määrittää kosteusmäärä näytepaloilla tai aistinvaraisesti.

Taulukko 24. PVC-katon suhteellinen kosteus [%] eri korkeudella lämmöneristettä riippuu vuodenajasta ja kesällä vuorokaudenajasta. Arvot ovat suuntaa antavia.

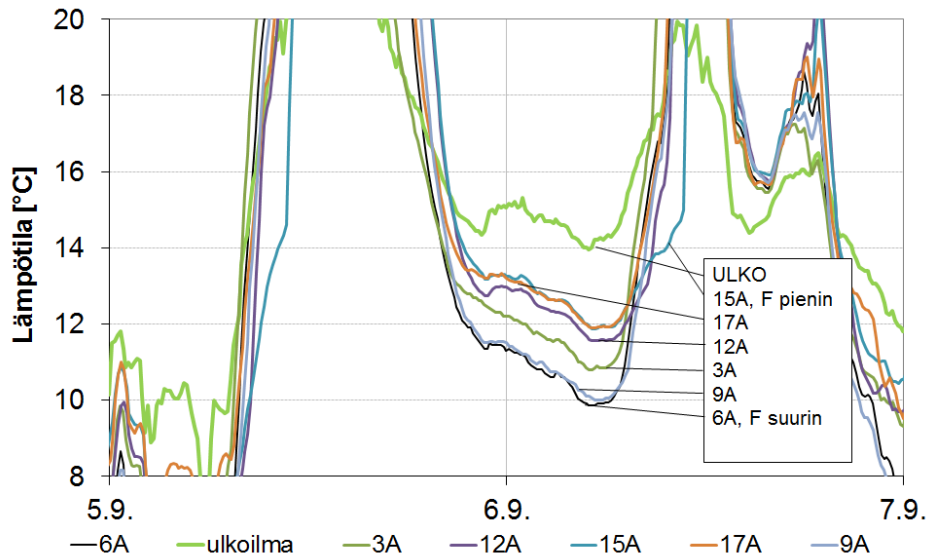
Katon kosteustilanne	sijainti lämmöneristees- sä	kesä, heinäkuu		talvi, joulukuu
		keskipäivä	yö	ei päivävaihtelua
kuiva (liite 2, kuva 2I)	yläpinta	10	55	98
	alapinta	100	35	40 - 60
kosteaa, ei jiirissä (kuva 54)	yläpinta	10	100	100
	alapinta	100	55	40 - 60

Mittauksista tehtävissä johtopäätöksissä on huomioitava katon rakennusfysikaalinen kokonaistoimivuus. Kosteusmittauksien tuloksia tulee tulkita huomioiden rakenne ja sen ikä, rakennuskosteuden määrä, sisä- ja ulkopuoliset reunaehdot, mittauksen ajankohta, mittauksen sijainti ja mittauskorkeus. Kosteusmittauksien tuloksia tulee verrata katon rakennuskosteuden arvioituun määrään. Jos mittaustuloksissa ei havaita kosteutta, vaikka katto rakennettiin sateisena aikana, voi syy olla väärässä mittaustaikassa. Jos mittauksen tehdään pitkän ajan kuluttua rakentamisesta, tulee ottaa huomioon kosteuden kuivuminen katosta. Uratuuletetussa PVC-katossa vähäinen rakennuskosteus voi poistua katosta jo viikkojenkin aikana.

6.3.9 Yön vastasäteily

Yön vastasäteily alensi katon lämpötilaa yöaikaan saman verran kesä-joulukuussa riippumatta vuodenajasta. Suurimmillaan vastasäteily oli 20.11, jolloin mitattiin katteen kylmin lämpötila mittausjaksolla: 12,6 °C alle ulkoilman lämpötilan. Keskimäärin pintalämpötila oli yöllä noin 5 °C alle ulkoilman lämpötilan. Vain muutamana yönä vastasäteilyä ei tapahtunut, jolloin katteen lämpötila vastasi ulkoilmaa.

Kuvassa 64 on esitetty tutkimusalueiden 1 - 5 ulkopinnan lämpötila. Mitä suurempi näkyvyyskerroin tarkastelupisteestä on taivaalle, sitä kylmemmäksi sen lämpötila laskee yöllä. Kuvan 64 tuloksien perusteella ei ole mielekästä määrittää ulkopinnan lämmönsiirtokerrointa ilmaan, sillä kyseisessä tapauksessa katon lämmönsiirto tapahtui ulkoilmaan, taivaalle sekä läheisiin seiniin.



Kuva 69. Katon yläpinnan lämpötila laskee yöllä alle ulkoilman. Piste 17A lämpötila ei ole suoraan verrattavissa eri sisäilman lämpötilan ja läheisten pintojen vuoksi. Tarkastelupisteet on lueteltu pienimmästä suurimpaan näkökertoimeen taivaan ja katon välillä.

Yön vastasäteily ei katolla ole niin suurta kuin kirjallisuudessa on esitetty. Osittain tämä voi johtua tutkimusalueiden viereisistä seinistä. Kompaktikatossa vastasäteilyn merkitys katon kosteusteknisen toimivuuden kannalta ei ole niin suuri kuin tuuletetussa katossa. Loivien kattojen taivaan näkyvyyskertoimet ovat hyvin suuria, lähes 1.

7 Laskennallinen tarkastelu

7.1 Yleistä laskennallisesta mallintamisesta

Rakenteiden kuivuminen on yleensä hidasta. Erityisesti jos kuivuminen perustuu pelkästään diffuusioon ja rakennuskosteuden määrä on suuri, voidaan kuivumisen olettaa kestävän jopa vuosia. Hitaan kuivumisen vuoksi PVC-katon kuivumiskyvyn selvittämisessä on hyödyllistä käyttää tietokoneohjelmia, joilla voidaan simuloida vuosien aikana tapahtuvaa kuivumista. Laskennan etuna on lisäksi mahdollisuus niin sanottuun herkkyyksianalyysiin, jossa eri parametrien vaikutusta rakenteen toimintaan voidaan helposti arvioida. Toisaalta monet valitut laskentaparametrit saattavat erota todellisista arvoista. Tällöin epävarminta parametria voidaan haarukoida, mikäli tiedetään miten rakenne käyttäytyy todellisuudessa esimerkiksi kenttämittauksien avulla.

Tietokonesimuloinnin tuloksia on arvioitava vertaamalla niitä käytännön kokemukseen rakenteiden toiminnasta tai mittaustuloksiin. Laskentatulokset sisältävät aina oletuksia ja kuvaavat tarkalleen vain oletettua ideaalista tapausta.

Laskennassa käytettiin kahta ohjelmistoa: Wufi 4 ja Comsol Multiphysics 4.2. Wufi laskennat käsittivät pidempiä vuosilaskentoja ja Comsolilla laskettiin tarkempia laskuja, joissa huomioitiin esimerkiksi uratuuletuksen kuivaava vaikutus.

7.2 Lämpö ja kosteustekninen laskentamalli PVC-katosta

7.2.1 Laskentayhtälöt

Wufi 4-ohjelman yhtälöt on esitetty lähteessä [36]. Seuraavassa esitetään Comsol Multiphysics -laskentaohjelman käyttämät yhtälöt. Lämmön- ja kosteudensiirtymis-yhtälöt (liitteessä 4 yhtälöt H ja N) on muodossa:

$$\nabla * (k \nabla T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (29)$$

$$\nabla * (D \nabla v) - R = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (30)$$

Lisäksi käytetään kosteudelle vesifaasissa yhtälöä:

$$R = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (31)$$

Yhtälö 29 kuvaa lämmönsiirtymistä. Yhtälö 30 kuvaa vesihöyryn (v) siirtymistä ja yhtälö 31 veden (w) siirtymistä. Yhtälössä 30 ei ole lainkaan absoluuttisen kosteuden aika-derivaatalle kerrointa (kosteuskapasiteettia), vaikka yhtälössä N (liite 4) sellainen on. Kertoimen sijasta käytetään yhtälöä 31, mikä huomioi materiaalin kosteuskapasiteetin eli sorptiokäyrän. Yhtälö 31 on yksinkertaisempi kuin yhtälö 30, koska katossa ei tapahdu merkittävästi kapillaarista kosteudensiirtymistä. Yhtälöiden 30 ja 31 R-termi kuvaa kosteudensiirtymistä materiaalin huokospinnan ja huokosilman välillä. Niiden arvot ovat samansuuruiset, mutta etumerkki yhtälöissä vastakkainen. R_c on kokeellinen reaktiokerroin, jonka arvo on 0,001. R-termi voidaan laskea kaavalla:

$$R = R_c * (w(\varphi) - w) \quad (32)$$

missä $w(\varphi)$ on materiaalin tasapainokosteuskäyrä. Laskennassa käytettiin tasapainokosteus-käyrästä myös versiota, jossa materiaalin tasapainokosteus riippuu lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Yhdessä laskennassa käytettiin 4:ää tietyn lämpötilavälin käyrää (kaavassa 33 vain 3 käyrää).

$$w(T, RH) = \begin{cases} w_1(\varphi), & T < T_2 \\ w_2(\varphi), & T_2 \leq T < T_3 \\ w_3(\varphi), & T_3 \leq T \end{cases} \quad (33)$$

Toinen variaatio sorptiokäyrästä huomioi hystereesin. Yhtälössä 34 on esitetty periaate, missä käytetään eri sorptiokäyrää riippuen vesimäärän derivaatan merkistä. Yhtälö ei huomioi hystereesissä tapahtuvia scanning-käyriä, vaan siirtyminen isotermiltä toiselle tapahtuu pystysuorasti.

$$w\left(\frac{\partial w}{\partial t}, \varphi\right) = \begin{cases} w_{ads}(\varphi), & \frac{\partial w}{\partial t} \geq 0 \\ w_{des}(\varphi), & \frac{\partial w}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (34)$$

Sorptiokäyrien tarkempaa huomioimista kosteusteknisissä laskennoissa on esitetty esimerkiksi lähteessä [47, s.567 - 574]. Sorptioisotermien tarkempi huomioiminen ei ole laskennoissa yleistä.

Rakenteen ulko- ja sisäpinnalla käytetyt yhtälöt ovat muotoa:

$$q_s = h_s * (T_{amb} - T_s) \quad (35)$$

$$g_s = \beta_s * (v_{amb} - v) \quad (36)$$

$$\beta_s = \frac{\alpha_s}{\rho c_p} \quad (37)$$

missä s tarkoittaa ulko- tai sisäpintaa. Kaava 35 kuvaa lämmönsiirtymistä pinnalla ja kaava 36 kuvaa vesihöyryn siirtymistä pinnalla. Massansiirtokerroin on laskettu Lewisin lailla, kaava 37. Pintojen yhtälöt liittävät laskentaan ohjelmaan syötetyt rakennetta ympäröivät reunaehdot. Ne ovat ilman absoluuttinen kosteus määrä ja lämpötila, mitkä riippuvat rakennuksen käyttötarkoituksesta ja ilmasto-olosuhteista.

Kattovuoto, kosteuden siirtyminen konvektiolla ja uratuuletus voidaan huomioida yhtälöissä 29 - 31 lisätermillä. Kattovuoto lisätään yhtälöön 31 vasemmalle puolelle positiivisena. Kosteudensiirtyminen konvektiolla lisätään yhtälöön 30 vasemmalle puolelle positiivisena. Uratuuletuksen kuivattava vaikutus voidaan huomioida negatiivisella lisätermillä yhtälön 30 vasemmalla puolella. Lisätermillä siirtyvät vesimäärät voidaan arvioida kappaleiden 5.5.2 (konvektio), 5.5.3 (kattovuoto) ja 5.6.3 (uratuuletus) avulla.

Yhtälöt 29 - 31 ovat osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, joka ratkaistaan yleensä numeerisella laskennalla. Joillekin yksittäistapauksille on kuitenkin olemassa tarkkoja analyttisiä ratkaisuja. Numeerinen laskenta voidaan tehdä esimerkiksi elementtimenetelmällä.

7.2.2 Laskennassa tarvittavat syötteet ohjelmalle

Comsol Multiphysics -laskentaohjelmaan syötettiin liitteessä 5 esitetyt parametrit ja muuttujat. Wufi 4 ohjelmassa käytettiin vastaavia siirtokertoimia ja alkuarvoja, mutta Wufin käyttämät muuttujat ovat ohjelmassa valmiina.

Laskentamalleissa käytetyt lämpötekniset materiaaliominaisuudet on esitetty taulukoissa 25 ja 26. Suurin osa materiaaliominaisuuksista valittiin vakioiksi.

Taulukko 25. Laskennassa käytetyt lämpötekniset materiaaliominaisuudet. $F(w)$ tarkoittaa vesipitoisuudesta riippuvaa lämmönjohtavuutta.

	paksuus [mm]	lämmönjohtavuus λ [W/mK]	tiheys ρ [kg/m ³]	ominaislämpökapasiteetti c_p [J/kgK]
Betonilaatta lähde	400	$f(w)$ [25]	2300 [31]	900 [31]
Bitumikermi TL2 lähde	3	0,23 [44]	1100 [44]	1000 [44]
Kivivilla 180 mm lähde	180	$f(w)$ [25],[48]*	90 RT-38135	850 [44]
Kivivilla 50mm lähde	50	$f(w)$ [25],[48]*	105 RT-38135	850 [44]
PVC-kermi lähde	1,2	0,15 Protan Oy	1167 Protan Oy	1500 Protan Oy
EPS lähde	230	0,041 Thermisol	15 Thermisol	1210 [44]

*[48] muokattu [25] perusteella

Betonin ja eristeen vesipitoisuudesta riippuvat lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 26. Kivivillan lämmönjohtavuus muunnettiin vesipitoisuudesta riippuvaksi lähteen [25] perusteella. Kun materiaalissa on suuria määriä vettä yli hygroskooppisen kosteudensitomiskyvyn, nousee lämmönjohtavuus (kuva 7). PVC-katossa vesipitoisuuden nousu lähelle kapillaarikyllästyspistettä on mahdollista vain jiirissä.

Taulukko 26. Betonin ja eristeen vesipitoisuudesta riippuvat lämmönjohtavuudet. Ohjelmat ratkaisevat lämmönjohtavuuden lineaarisella interpolaatiolla taulukon arvoista.

Kivivilla 180 mm		Kivivilla 50 mm		Betonilaatta	
w	λ	w	λ	w	λ
0	0,035	0	0,036	0	1,6
10	0,035	10	0,036	180	2,602
20	0,03584	20	0,03684		
50	0,038	50	0,039		
100	0,044	100	0,045		
200	0,065	200	0,066		
300	0,098	300	0,099		
400	0,143	400	0,144		
500	0,2	500	0,201		
600	0,269	600	0,27		
700	0,35	700	0,351		
800	0,443	800	0,444		
900	0,548	900	0,549		
950	0,605	950	0,606		

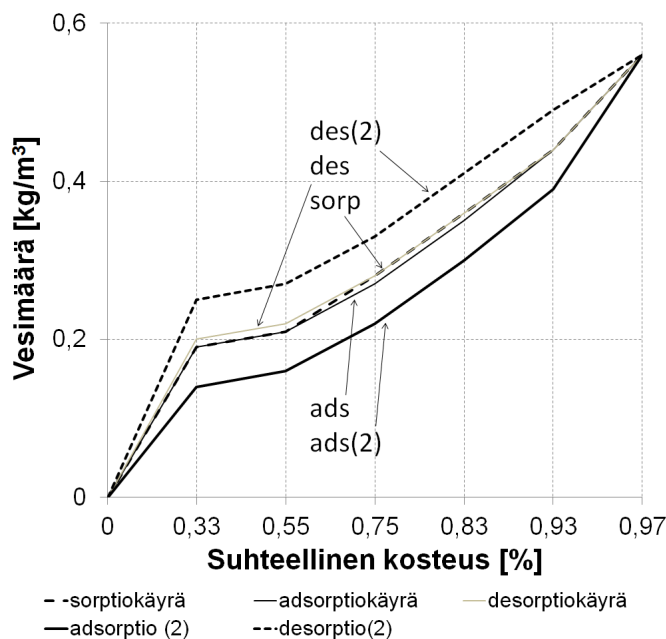
Esitetyt lämpötekniset materiaaliominaisuudet valittiin siten, että laskenta antoi hyväksyttävällä tarkkuudella oikeita tuloksia korkeuksien A, B ja C (kuva 38) lämpötiloiksi. Valittuja materiaaliominaisuuksia ei tarvinnut muuttaa lähteiden mukaisista arvoista.

Materiaalien diffuusiovastuskertoimet on esitetty taulukossa 27. Kertoimia skaalattiin mallinnuksessa käytetyn kerrospaksuuden mukaan. Esimerkiksi Wufissa PVC-kermin diffuusiovastuskerroin oli 327, kun kermi mallinnettiin 50 mm paksuisena kerroksena. Skaalausta käytetään vain, jos kerros mallinnetaan eri paksuudella kuin mitä se todellisuudessa on. Skaalaus on esitetty lähteessä [49].

Taulukko 27. Materiaalien vesihöyryn diffuusiovastuskertoimet.

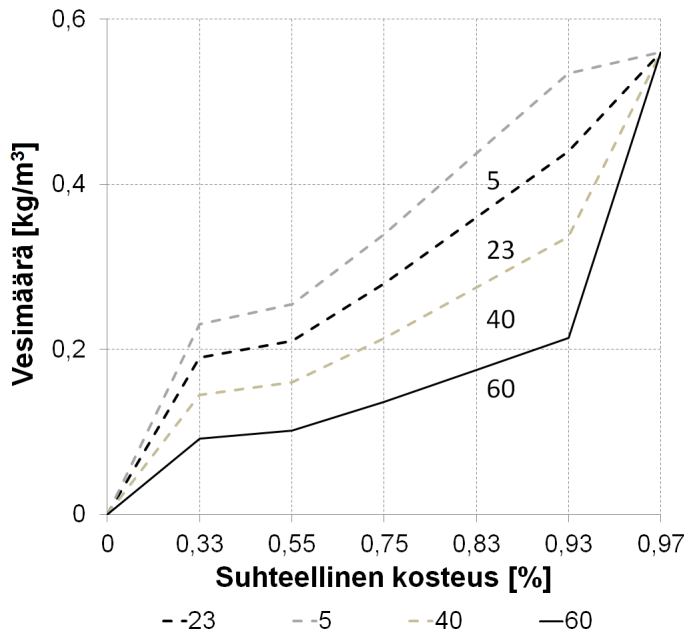
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	
	μ [-]
Betonilaatta	180
Kivivilla	1,3
Bitumikermi	105117
PVC-kermi	13632
EPS	21,7 / 40 (vertailuarvo)

Kivivillan (tiheys 92 kg/m^3) sorptiokäyränä käytettiin perustapauksessa kuvan 70 mukaista käyrää. Kuvassa 70 on myös esitetty kivivillan mitatut absorptio- ja desorptiokäyrät [20]. Hystereesin vaikutus on hyvin pieni kyseisellä kivivillalla. Kuvassa 70 on lisäksi kuvattu absorptio- ja desorptiokäyrät, missä hystereesin vaikutusta on suurennettu. Tällä pyrittiin testaamaan vaikuttaako hystereesin suureneminen laskentatuloksiin. Hystereesi huomioitiin laskennassa kaavalla 34. Wufissa käytettiin kaikissa laskentamalleissa kuvan 70 sorptiokäyrää.



Kuva 70. Laskennassa käytetyt sorptio-, absorptio- ja desorptiokäyrät. (2) tarkoittaa laskentamallia, jossa hystereesin vaikutusta suurennettiin.

Kuvassa 71 on esitetty kivivillan sorptiokäyrän lämpötilariippuvuus. Lämpötilariippuvuutta testattiin laskentamallissa, koska PVC-katon lämpötilat nousevat voimakkaasti auringonpaisteessa. Kuvan 71 käyrät on muodostettu lähteen [24] tuloksien perusteella kivivillan sorptiokäyrän lämpötilariippuvuudesta. Lämpötilasta riippuvat sorptiokäyrät huomioitiin ohjelmassa kaavalla 33. Kokeilun vuoksi laskennassa käytettiin myös päinvastaista lämpötilariippuvuutta, mutta tästä riippuvuudesta on vähän tutkimustuloksia (kuva 24, eriste, tiheys 37 kg/m^3).



Kuva 71. Laskennassa käytetty lämpötilasta riippuva hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä. Eri lämpötilojen käyrät määritetty 75 % suhteellisessa kosteudessa mitatun kosteusmäärän mukaan lämpötiloissa 5 °C ja 23 °C (taulukko 25). Lämpötilariippuvuus ei esiinny alhaisimmilla ja korkeimmilla RH tasoilla.

Taulukossa 28 on esitetty laskennassa käytetyn kivivillan hygroskooppisen kosteusmäärän riippuvuus lämpötilasta 75 % suhteellisessa kosteudessa [24]. Kuvassa 25 on esitetty taulukon 28 mukaisen villan lisäksi muiden eristeiden lämpötilariippuvia hygroskooppisia kosteusmääriä. Suurimmalla osalla lasi- ja kivivillaeristeitä riippuvuus on negatiivinen välillä 5 - 23 °C eli lämpötilan noustessa eriste sitoo vähemmän kosteutta. 40 °C ja 60 °C lämpötilojen sorptiokäyrät määritettiin siten, että riippuvuus jatkuu negatiivisena suuruusluokaltaan vastaavasti, kuin 5 °C ja 23 °C lämpötilojen välillä alentunut kosteusmäärä.

Taulukko 28. Kivivillan hygroskooppisesti sitoman vesimäärän lämpötilariippuvuus 75 % suhteellisessa kosteudessa [24, s.61]. 40 °C ja 60 °C arvot laskettu vastaavalla derivaatalla (dw/dT) kuin mittauksissa välillä 5 - 23 °C.

Vesimäärä [kg/m ³], RH=75 %	Lämpötila T [°C]				
	-10	5	23	40	60
	0,3	0,34	0,27	0,214 (lask.)	0,136 (lask.)

Hygroskooppisissa tasapainokosteuskäyriä käytettiin kaikissa edellä kuvatuissa sorptiokäyriä lisäarvoa kosteusmäärälle tilanteessa, missä suhteellinen kosteus on 100 %. Kosteusmääräksi valittiin tällöin 5 kg/m³, mitä käytettiin Comsolissa. Valittu kosteusmäärä on samaa luokkaa, kuin kuvassa 24 esitetyt EPS:n ja XPS:n sorptiokäyrät Pohjois-Amerikkalaisten tietojen mukaan [25].

On esitetty, että 101 % suhteellisessa sorptiokäyrän arvona voidaan käyttää kaavalla 38 saatavaa suurinta mahdollista materiaalin sisältämää vesimäärää [50].

$$w_{max} = \text{huokoisuus} * 1000 \text{kg/m}^3 \quad (38)$$

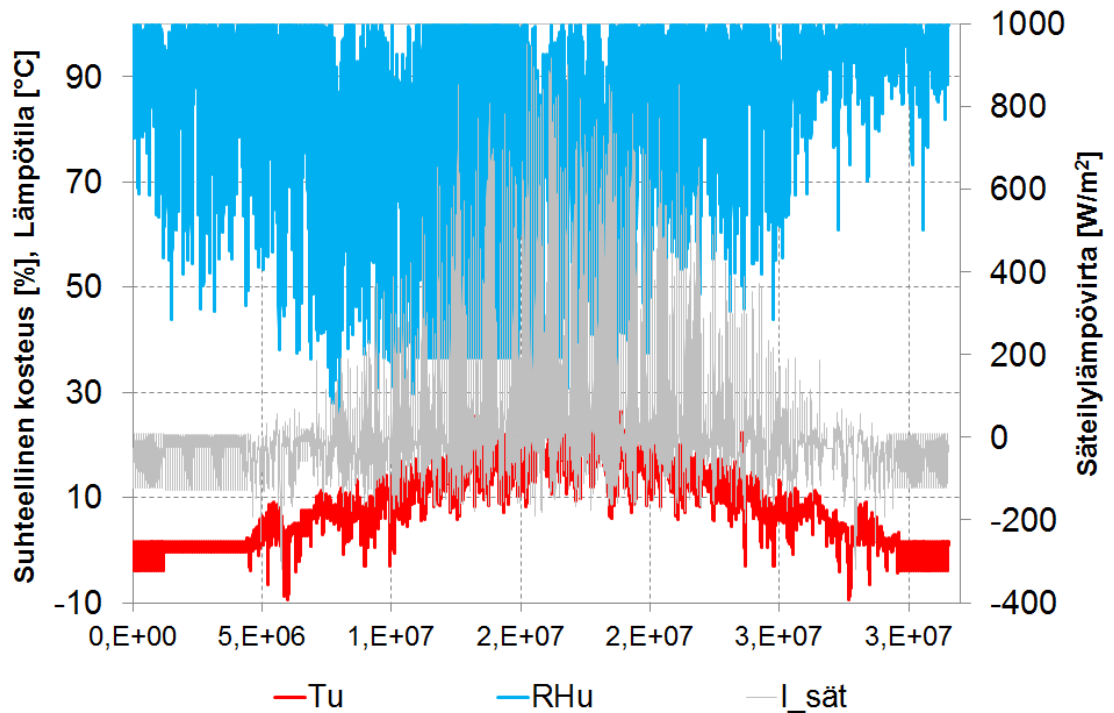
Mineraalivillojen huokoisuus on luokkaa 95 - 99 % [4, s.152]. Tällöin kaavalla 38 suhteellisella kosteudella 101 % sorptiokäyrän mukainen kosteusmäärä olisi luokkaa 950 kg/m³. Näin korkea kosteusmäärä aiheutti Comsol-laskennassa konvergoitumiongelmaa, mistä syystä Comsol-laskennassa käytettiin korkeimpana sorptiokäyrän arvona 5 kg/m³ suhteellisella kosteudella 100 % kivivillalle ja 101 % kosteudessa EPS:lle. Kivivillalla välillä 97 % ja 100 % ei asetettu muita arvoja eristeen kosteusmäärälle, koska ne eivät vaikuttaneet laskentaan. Näillä valinnoilla laskennassa ei ilmennyt merkittäviä ongelmia. Wufissa sorptiokäyrien arvo 101 % suhteellisessa kosteudessa määräytyi kaavan 38 mukaisesti.

Betonin ja EPS:n sorptiokäyrä on esitetty taulukossa 29. PVC-kattella ja bitumikermillä ei ollut hygroskooppista kosteudensitomiskykyä.

Taulukko 29. Betonin ja EPS:n hygroskooppisen tasapainokosteudet. EPS:n kosteusmääränä käytettiin Comsolissa 101 % suhteellisessa kosteudessa 5 kg/m³.

Betonilaatta [25, IBP]				EPS [25, Lund]	
RH	w	RH	w	RH	w
[-]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]
0	0	0,5	48	0	0
0,05	27	0,6	58	0,35	0,12
0,1	32	0,7	72	0,5	0,16
0,15	34	0,8	85	0,8	0,18
0,2	35	0,9	100	0,9	0,27
0,3	37	0,95	118	1	0,6
0,4	40	1	150	1,01	5 (Comsol)

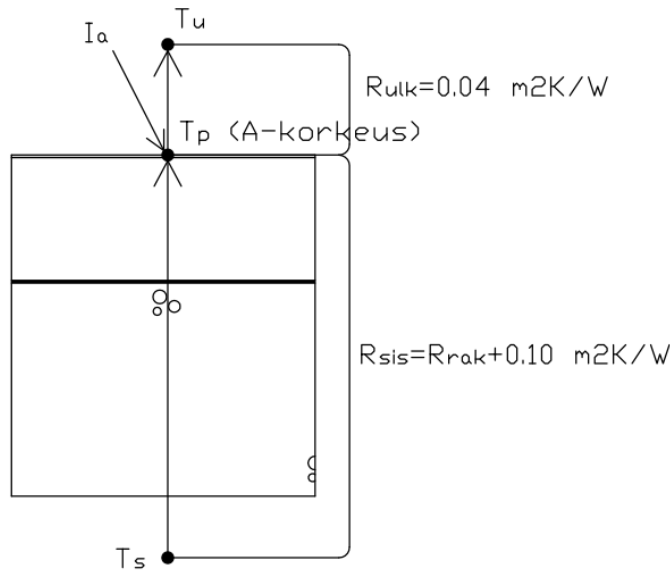
Ulkoilman reunaehdot Comsolissa (T_u , RH_u ja $I_{sät}$) muodostettiin 23.6–9.12.2011 välillä tehtyjen kenttämittausten perusteella. Suhteellisen kosteuden muodostuksessa alin arvo kosteudelle oletettiin päivänä 1.6 ja lämpötilan sekä säteilyreunaehdon suurin arvo oletettiin päivälle 15.7 [15, s.36 - 37]. Näiden päivien perusteella korvattiin puuttuvien päivien säätiedot, siten että syyspäivän etäisyys ääriarvopäivästä oli yhtä suuri kuin kevätpäivän. Esimerkiksi päivän 31.5 lämpötila vastasi päivän 2.6 lämpötilaa. Ajanjaksoilta, joilta puuttui vertailupäivä, data korvattiin mahdollisimman sopivalla päivällä. Tämä näkyy reunaehdoissa ajanjaksoina, jolloin suureen vaihtelevuus vähenee. Kuvassa 72 on esitetty laskennassa käytetyt reunaehdot rakenteen ulkopuolella.



Kuva 72. Comsol Multiphysics laskennassa käytetyt reunaehdot 1.1–31.12 rakenteen ulkopuolen lämpötilalle, suhteelliselle kosteudelle ja säteilylle perustuivat kenttätutkimuksen mittauksiin.

Reunaehtojen tarkkuus oli edellytyksenä laskennassa, sillä laskennassa tarvittiin katon ulkopinnalle tarkkoja päivittäisiä reunaehtoja esimerkiksi uratuuletuksen oikeanmukaiseen huomiointiin. Yleensä pitkän ajan laskelmissa ei käytetä näin tarkkoja reunaehtoja ja ne voidaan syöttää ohjelmalle jopa kuukauden tarkkuudella. Sisäilman olosuhteet Comsol-laskennassa olivat 21 °C amplitudilla 1 °C (korkein arvo oli 15.7) sekä 50 % amplitudilla 10 % (korkein arvo oli 15.7). Wufi-laskennan reunaehdot on kuvattu laskentamallien yhteydessä (taulukko 29).

Säteilyn lämpövirran huomioiminen laskennassa on esitetty lähteessä [36, s.31]. Tässä tutkimuksessa auringon säteily ja lisäksi säteily avaruuteen huomioitiin Comsolissa laskemalla säteilyintensiteetti kattopinnan lämpöasetarkastelulla. Pintalämpötilana käytettiin kohteesta mitattuja lämpötiloja pisteestä 6.



Kuva 73. Säteilyintensiteetin laskemiseen käytetty energiatasemalli. Laskentatulokset syötettiin Comsol Multiphysics laskentaohjelmaan ulkopinnan säteilyreunaehdoksi.

Säteilyintensiteetti saatiin kuvan 73 mukaisesti kaavalla 54. Kaavassa oletetaan katteen absorptio- ja emissiokertoimen olevan 1,0, koska laskennassa säteilylämpövirta lisätään pinnan solmupisteeseen ilman siirtokerrointa.

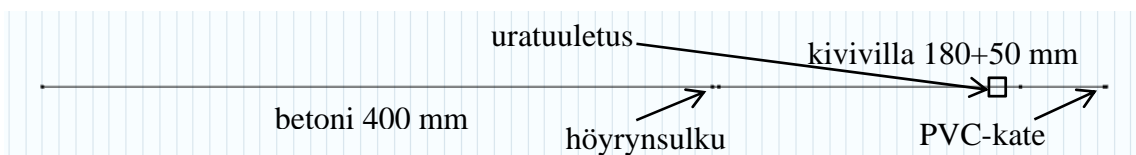
$$I_a = \frac{dT_{ulk}}{R_{ulk}} - \frac{dT_{sis}}{R_{sis}} \quad (39)$$

Kuvassa 73 kesällä katolle kohdistuu suuri positiivinen säteilylämpövirta. Kattoon vaikuttaa läpi vuoden yön vastasäteily, jolloin säteily on katolta avaruuteen. Kaava 39 antaa tarkan reunaehdon auringonsäteilyn ja yön vastasäteilyn vaikutuksen laskemiseksi, mutta yleensä kaavan käyttäminen ei ole mahdollista tarvittavan mittaustiedon puuttuessa. Ulkopinnassa vaikuttaa lisäksi normaali pinnan ja ilman välinen säteilyllä ja konvektiolla tapahtuva lämpövirta. Kaavaa 39 ei voi käyttää kun katolla on lumipeite. Lumipeitteen havaittiin tutkimuskohteessa ensimmäisen kerran 12.12.2011. Lumipeitteen aikaan kaavan 39 negatiivisen lämpövirran voisi asettaa nolaksi, mutta tätä ei tehty, koska katsottiin, että yön vastasäteily on hyvä huomioida laskennassa. Talviajan laskenta tehtiin tarkoilla reunaehdoilla vain yhdessä kondenssiherkkyyden tarkastelussa.

Säteilyä ei huomioitu Wufissa, sillä se hidasti laskentaa ja aiheutti laskentaan virhettä, mutta toisaalta huomioiminen ei ollut tarpeellista Wufilla tehdyissä pitkän ajanjakson laskennoissa.

7.2.3 Laskentageometriat

Laskentamallit olivat yksiulotteisia, mikä vastaa katon toimintaa, kun kosteus on tasaantunut katossa eri alueiden välillä. Mallit eivät siis huomioi tutkimusalueen 4 mukaista kosteuden sivuttaista siirtymää. Kuvassa 74 on esitetty laskentageometria Comsol Multiphysicsissä. Laskettava rakenne erosi kenttätutkimuksen kattorakenteesta siten, että laskennassa kantavassa rakenteessa ei ollut kuvan 38 mukaisia onteloita, vaan laatta oli kokonaan betonia. Tämä ei vaikuta merkittävästi rakenteen toimintaan, sillä lämpötila laatan yläpinnassa eroaa noin 1 °C verran ontelolaatan ja betonilaatan välillä, mikä tarkistettiin laskennan ja mittausdatan avulla. Tämä viittaa ilman luonnolliseen konvektioon ontelossa, mikä laskee ilman lämmöneristävyyttä betonin tasolle.



Kuva 74. 1-ulotteinen laskentageometria.

Yksiulotteisessa laskennassa ohjelma käyttää kaikkien materiaalien pinta-alana yhtä neliometriä, jotta aikariippuva laskenta on mahdollinen. Tällöin materiaaleille voidaan laskea muun muassa lämpökapasiteetti.

Kuvassa 70 on esitetty laskentaverkko. Yksiulotteisessa mallissa solmupisteiden määrä on vähäinen, jolloin laskenta-aika on lyhyempi kuin kaksiulotteisessa laskennassa. Tämä on tärkeää erityisesti, jos laskentaa toistetaan esimerkiksi eri materiaaliominaisuuksilla tai reunaehdoilla. Mallin dimensioiden määrä riippuu aina loppupeleissä rakenteen monimutkaisuudesta, jolloin yksinkertaisilla rakenteilla voidaan käyttää yksiulotteista mallia.



Kuva 75. Käytetyn laskentaverkon solmupisteiden määrä oli alle 100 (Comsol multiphysics).

Kuvassa 71 on esitetty Wufi 4 -ohjelman laskentageometria. Kantavaa rakennetta ei huomioitu Wufissa, sillä sen vaikutus katon kuivumiseen ulkoilmaan ei ole ratkaiseva.

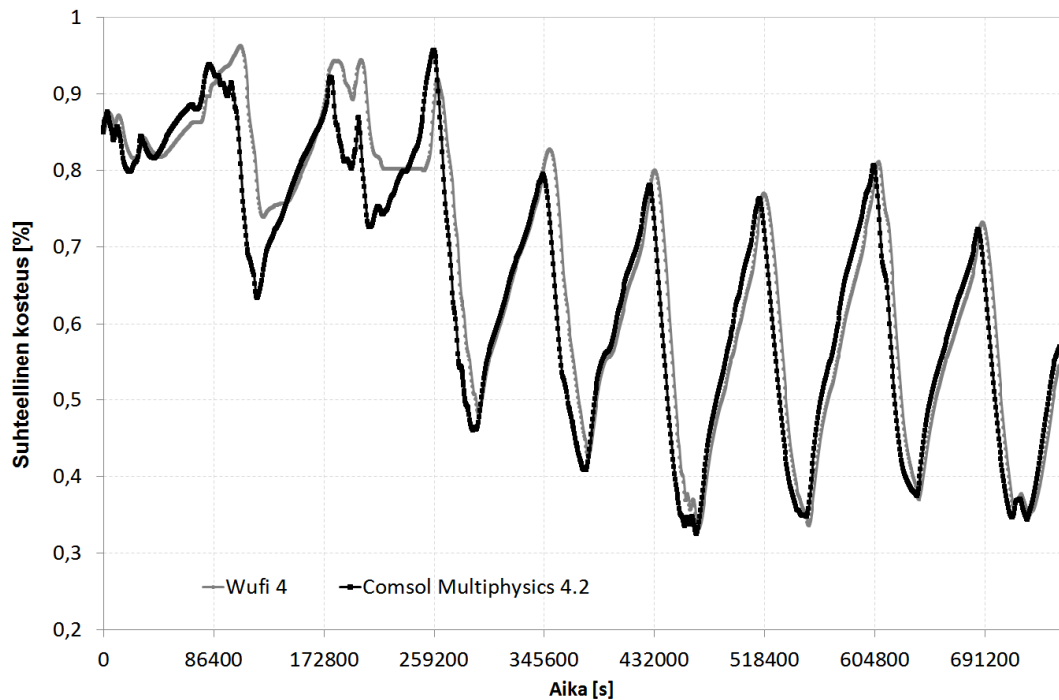


Kuva 76. PVC-katon laskentageometria Wufi 4 -ohjelmassa. Tiiviit pinnat on skaalattu paksumiksi laskennan toimivuuden parantamiseksi.

7.2.4 Laskentaohjelmien vertailu

Kappaleessa 7.2.1 esitetyt laskentayhtälöt, lukuun ottamatta yhtälöitä 33 ja 34, perustuvat Wufi-ohjelman käyttämiin yhtälöihin. Samoja yhtälöitä käytetään Comsol Multiphysics 3.5 -ohjelmassa, jonka laskentamalli on osoitettu toimivaksi [51]. Tässä työssä on kehitetty laskentamallia lisäämällä Comsol-malliin [51] yhtälöt 33 ja 34.

Laskennassa käytettiin Comsol Multiphysics 4.2 -ohjelmaa, jonka laskentamalli eroaa jossain määrin aiemmin kehitetystä 3.5 version laskentamallista [51]. Jotta voidaan varmistaa laskennan oikeellisuus, kuvassa 77 on esitetty laskentatulokset Wufi 4 sekä Comsol Multiphysics 4.2 -ohjelmilla. Comsol laskenta vastaa Wufin laskentaa riittäväällä tarkkuudella. Wufin laskentamallia pidetään toimivana kosteusteknisissä tarkasteluissa. Kuvan 77 laskenta on tehty samalla PVC-katon laskentamallilla, jota käytetään varsinaisessa laskennassa.



Kuva 77. Comsol Multiphysics 4.2 -laskentamallin tulokset vastaavat Wufi 4 -ohjelman tuloksia.

Käytetyssä laskentamallissa ei huomioitu faasimuutoslämpöä. Kenttätutkimuksen tuloksiin vertaamalla tämä ei vaikuttanut lämpötilalaskennan toimivuuteen.

7.2.5 Laskentamallit

Laskentamalleissa tarkasteltiin seuraavia ilmiöitä:

1. PVC-katon kosteusliikkeen laskennallinen mallintaminen päivätarkkuudella (taulukko 28, laskentamallit 1 - 6)
2. PVC-katon kuivuminen pitkällä aikavälillä (taulukko 29, laskentamallit 7 - 12)
3. Uratuuletuksen kuivatuskyky
4. Kosteuden pystysuora liike ja EPS-kaatojen vaikutus siihen
5. Uratuuletuksen kondensoimisherkkyys
6. Kevätkondenssi

Katon kosteusliikkeiden tarkka mallintaminen on haasteellista, sillä yleisesti ottaen HAM-mallit (heat, air and moisture) eivät ole pystyneet tarkasti huomioimaan kosteuden liikettä reunaehdon voimakkaan muutoksen, esimerkiksi auringonsäteilyn seurauksena. Kohdan 2 tarkoitus on selvittää, kuinka kauan katon kuivuminen kestää diffuusiolla ja vaikuttaako tähän ulkoilman kosteuspitoisuus tai lämmöneriste. Kenttätutkimuksessa katolla oli jiirissä EPS-kiilat kaatoja varten, joiden vaikutusta kuivumiseen arvioitiin kohdan 3 laskennalla. Neljäs tarkastelu keskittyi uratuuletuksen kuivatuskykyyn ja 5 sekä 6 uratuuletuksen mahdollisiin kondenssiongelmiin.

Katon kosteusliikkeen mallinnus päivätarkkuudella

Päivätarkkuuksisen kosteusliikkeen tarkastelua varten tehtiin eri laskentamalleja, jotka on kuvattu taulukossa 30. Mallien tarkoitus oli selvittää, millä sorptiokäyrällä eristeen kosteuskäyttäytyminen kesäpäivänä saadaan mahdollisimman oikeanlaiseksi. Tarkasteltava suure oli päivittäin voimakkaasti vaihtuva suhteellinen kosteus lämmöneristekerroksessa. Lisäksi malleissa 6 ja 6B tarkasteltiin vertailun vuoksi esiintyykö EPS-katossa samanlainen suhteellisen kosteuden päivävaihtelu kuin kivivillakatossa.

Taulukko 30. Laskentamallit päivittäisen kosteusliikkeen arviointiin. Lämmöneristeen alkukosteus oli 85 %. Laskentamalleissa 1 - 5 eristeen diffuusiovastuskerroin $\mu=1,3$.

malli	mallin kuvaus	muuta:
laskentamalli 1	eristeen sorptio $f(RH)$	perustapaus laskennalle
laskentamalli 2	eristeen sorptio $f(RH)$	ei "häntää" kun $RH100\%$
laskentamalli 3	eristeen sorptio $f(T,RH)$	lämpötilan huomiointi
laskentamalli 3B	eristeen sorptio $f(T,RH)$	lämpötilariippuvuus toisinpäin
laskentamalli 4	eristeen sorptio $f(D(w),RH)$	hystereesi
laskentamalli 5	eristeen sorptio $f(D(w),RH)$	hystereesi, vaikutusta voimistettu
laskentamalli 6	eristeen sorptio $f(RH)$	EPS, $\mu=21,7$
laskentamalli 6B	eristeen sorptio $f(RH)$	EPS, $\mu=40$

PVC-katon kuivuminen pitkällä aikavälillä

PVC-katon kuivumista pitkällä aikavälillä tarkasteltiin 6 vuoden laskennalla. Laskentamallien muodostamisessa käytettiin avuksi edellä kuvattuja laskentamalleja 1 - 6, joiden perusteella valittiin sorptiokäyrä lämmöneristeelle. Laskentamallit 7 - 11 on kuvattu taulukossa 30. Tarkastelu tehtiin Helsingissä ja Sodankylässä. Helsingissä tehtiin lisäksi tarkastelu, jossa ulkoilman kosteus nousi 10 % ja tarkastelu, jossa sisäilman kosteus nousi 90 %:iin. Höyrynsulku oli tässä tarkastelussa vastaava bitumikermi mitä kenttätutkimuksessa. Lisäksi tarkasteltiin EPS eristettyä kattoa.

Taulukko 31. Laskentamallit 6 - 12.

malli	mallin kuvaus	Lämmöneristeen Alkukosteus w,φ	Reunaehdot
laskentamalli 7 (Wufi 4)	PVC katon kuivuminen diffuusiolla, Helsinki 1.6.2011-1.6.2017	97 % = 0,56 kg/m ³	Ts=21°C (amplitudi 1, max 3.6), RH=45% (amplitudi 15, max 16.8), Helsinki: Tu=4,5 °C (amplitudi 12,1, max 15.7), Rhu=79,9 (amplitudi 10, max 1.12)
laskentamalli 8 (Wufi 4)	PVC katon kuivuminen diffuusiolla, Sodankylä 1.6.2011-1.6.2017	97 % = 0,56 kg/m ³	Ts=21°C (amplitudi 1, max 3.6), RH=45% (amplitudi 15, max 16.8), Sodankylä: Tu= -1 °C (amplitudi 14,5, max 15.7), Rhu=78,7(amplitudi 12, max 15.11)
laskentamalli 9 (Wufi 4)	PVC katon kuivuminen diffuusiolla, Helsinki +10% 1.6.2011-1.6.2017	97 % = 0,56 kg/m ³	Ts=21°C (amplitudi 1, max 3.6), RH=45% (amplitudi 15, max 16.8), Helsinki: Tu=4,5 °C (amplitudi 12,1, max 15.7), Rhu=89,9 (amplitudi 10, max 1.12)
laskentamalli 10 (Wufi 4)	PVC katon kuivuminen diffuusiolla, Helsinki, 1.6.2011-1.6.2017	97 % = 0,56 kg/m ³	Ts=30°C (amplitudi 1, max 3.6), RH=90% (amplitudi 5, max 16.8), Helsinki: Tu=4,5 °C (amplitudi 12,1, max 15.7), Rhu=79,9 (amplitudi 10, max 1.12)
laskentamalli 11 (Wufi 4)	PVC katon kuivuminen diffuusiolla, Helsinki, Eriste: EPS, 1.6.2011-1.6.2017	97 % = 0,50 kg/m ³	Ts=21°C (amplitudi 1, max 3.6), RH=45% (amplitudi 15, max 16.8), Helsinki: Tu=4,5 °C (amplitudi 12,1, max 15.7), Rhu=79,9 (amplitudi 10, max 1.12)
laskentamalli 12 (Comsol Multiphysics 4.2)	PVC katon kuivuminen diffuusiolla ja uratuuletuksella, katevuoto 1.6.-31.6.2011	50 % ->vuoto	Kenttätutkimuksen ulko-olosuhteet päivätarkkuudella. Katevuoto 8.6

Uratuuletuksen kuivatuskyyky

Laskentamallissa 12 (taulukko 31) kattorakenteeseen lisättiin kosteutta kattovuodolla. Kosteuden lisääminen mallinnettiin kosteuslähteenä, joka lisättiin rakenteeseen 30 minuutin aikana. Lisättävän kosteuden määrä määritettiin kappaleen 5.5.3 mukaisesti, joten 0,2 cm² vuotoaukosta kattoon siirtyvä vesimäärä 30 minuutin aikana 5 cm vesipatsaalla on 0,21 kg/m². Tässä oletettiin, että vesi leviää 10 m matkalle jiiressä.

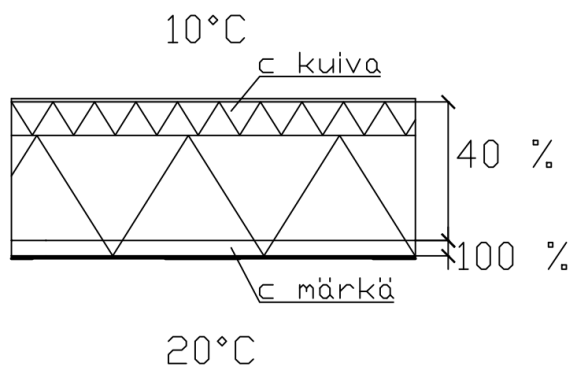
Laskentamallissa 12 käytettiin uratuuletusta, joka lisättiin negatiivisena kosteuskuormana yhtälön 26 mukaisesti. Uratuuletus vaikutti syvyydellä 60 mm katon yläpinnasta, jolloin sen lämpöolosuhteet olivat oikeat. Lämpöolosuhteet vaikuttavat ratkaisevasti uran kosteudenpoistokykyyn. Tuuletusuran nopeutena käytettiin 0,05 m/s ja uran pinta-alana 0,02 x 0,03 m². Uramäärä metrin leveydellä on 4,5 ja kokoojakanavien etäisyys 30 m. Ohjelma laskee uratuuletuksen kosteudenpoiston kaavalla 40. Kaavassa kaavan alkuosan numeroarvoilla on siis laskettu katoneliöllä siirtyvä ilmavirta [m³/s].

$$g_{\text{kuiv.urat}} = \frac{4,5 * 0,02 * 0,03}{30} * 0,05(v_{kr}(T_{ura}) - v_u) = 0,0000045 * (v_{kr}(T_{ura}) - v_u) \quad (40)$$

Kaavan 40 kerroin skaalattiin 0,0045:ksi, sillä kosteuskuorma [kg/s/m³] lisättiin 0,001 m³ tilavuuteen lämmöneristettä. Kaavalle 39 lisättiin ehto, että se siirtää kosteutta pois katosta, mutta ei siirrä sitä kattoon. Kaava 40 on yksinkertaistus todellisesta tilanteesta, mutta on hyödyllinen laskentatapa verrattuna monimutkaiseen ilmavirtauksen laskentaan.

Kosteuden pystysuora liike

PVC-katon sisäisten kosteusliikkeiden arvioinniksi tehtiin 1-ulotteinen laskentamalli kosteuden diffuusiosta lämmöneristeen sisällä. Mallin geometria on esitetty kuvassa 78.



Kuva 78. Lämmöneristeen sisäisen diffuusion 1-ulotteisen laskennan rakenne.

Mallissa kosteus ei pääse liikkumaan ulos rakenteesta, mutta siirtyy sen sisällä diffuusiolla. Tämä kuvaa lyhyellä aikavälillä tilannetta kompaktikatossa. Laskennassa huomioitiin materiaalien hygroskooppisesti sitoma kosteus, mikä oli rakenteen alaosassa 23 mm korkeudella 100 % suhteellisen kosteuden mukainen ja muualla 40 % mukainen. Lämpötilareunaehtoina olivat vakioämpötilat 10 °C ja 20 °C. Laskennasta tehtiin kaksi variaatiota, joista toisessa lämmöneristelevyjen, 180mm ja 50 mm, välissä oli 40 mm EPS-solumuovieristettä. Materiaaliominaisuudet olivat vastaavat kuin muissa laskennoissa.

Uratuuletuksen kondensoimisherkkyys

Uratuuletuksen kondensoitumisherkkyttä arvioitiin laskemalla katon lämpötiloja kylmällä ulkoilmalla. Tässä laskennassa ei laskettu kosteudensiirtymistä, vaan pelkästään lämmönsiirtymistä. Ratkaistut suureet olivat ulkoilman absoluuttinen kosteus (ulkoilman kosteus perustui tosin suoraan kenttämittauksiin) ja ilman kriittinen absoluuttinen kosteus katteen alla sekä uratuuletuksen korkeudella eristeessä. Ratkaistujen suureiden perusteella arvioitiin uratuuletuksen kondensoimisherkkyttä kaavan 22 mukaisesti. Laskennassa generoitiin talven lämpötilat mittausdatasta muuttamalla joulukuun ja helmikuun välisenä aikana kenttämittauksessa mitattua ulkolämpötilaa nopeudella 1 °C viikossa, jolloin saatiin laskentaan kylmempi talviaika kuin vuonna 2011 (kuva 70). Kylmimmil-

lään ulkolämpötila oli noin $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ tammikuussa. Kaavaa 40 käytettiin siten, ettei kerrointa 0,0000045 skaalattu, koska kosteusmäärien jatkolaskelmat tehtiin taulukkolaskentaohjelmalla. Talven laskennassa ei huomioitu lumipeitettä katolla.

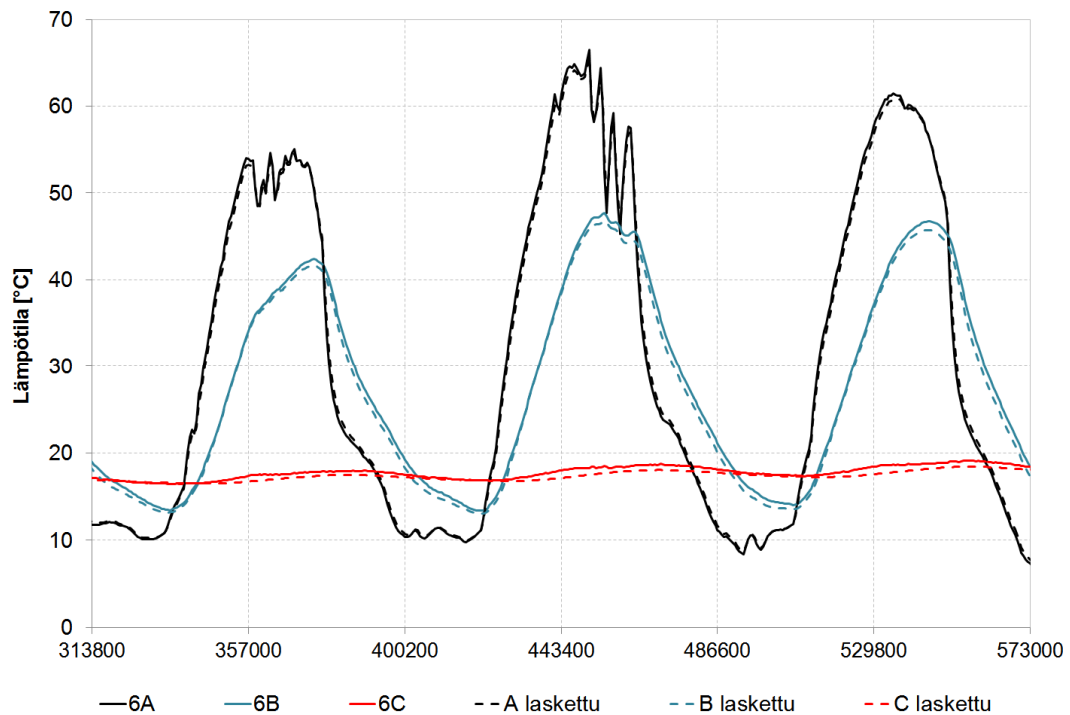
Kevätkondenssin mahdollisuus

Maalis-huhtikuussa katolla oleva lumi sulaa vähitellen, ja sen lämmönvastus pienenee kunnes lumi on sulanut kokonaan, mikä kestää 1 - 2 viikkoa. Lumen sulamisen ajankohda riippuu katon lämpötilajakaumasta ja auringonsäteilystä, joiden tarkka arviointi on vaikeaa. Kevätkondenssitilanne mallinnettiin asettamalla katteen ulkopuoliseksi reunaehdoksi lämpötila $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ajanjaksolle 2.5–16.5 (taulukko 21) ja tarkasteltiin tässä tilanteessa katteen alapuolista ja uratuuletuksen korkeudella olevia lämpötiloja sekä ulkoilman kosteutta. Laskentasuureet olivat samat kuin uratuuletuksen kondensoitumisherkyyden tarkastelussa. Paikkakunta oli Sodankylä, missä kevätkondenssin todennäköisyys on suurin taulukon 21 mukaisesti. Ulkoilman lämpötila generoitiin uratuuletuksen kondensoimisherkkyys -tarkastelun mukaisesti kenttätutkimuksen ulkolämpötiloista laskemalla kenttätutkimuksessa mitattua lämpötilaa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, jolloin lämpötila vastasi keskimääräistä Sodankylän ilmastoa [15, s.37] ja oli alimmillaan tammikuussa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.3 Laskentatulokset

Lämmönsiirtymisen laskenta

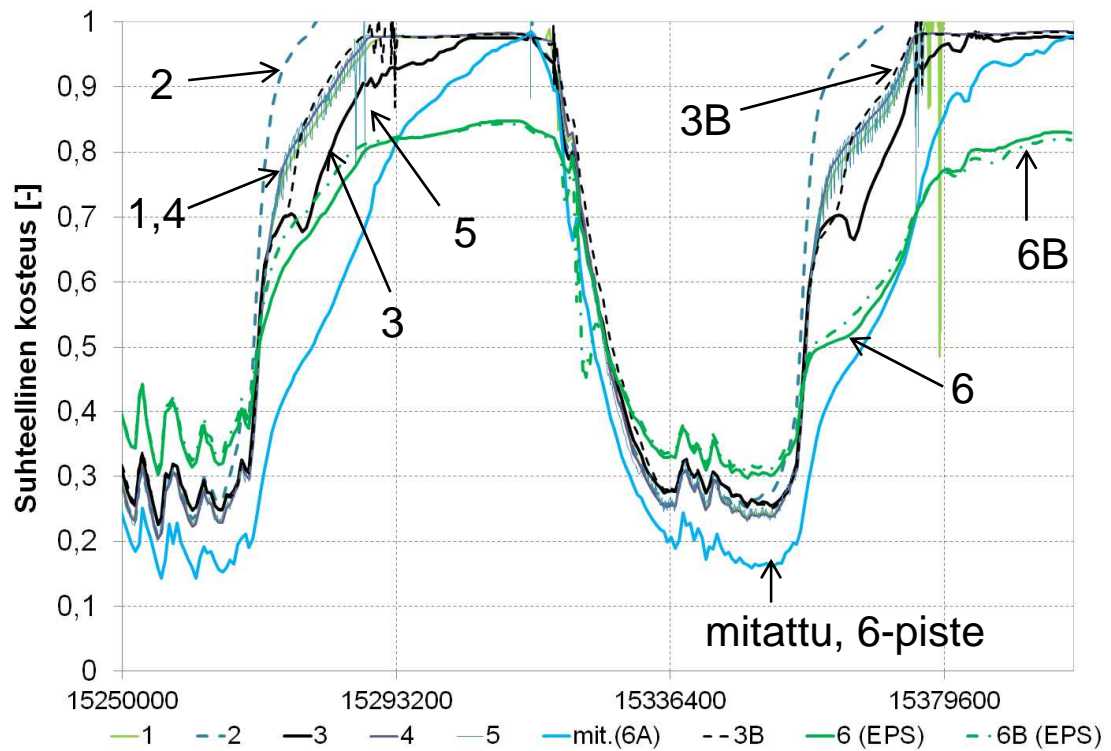
Lämmönsiirtymisen tuloksia tarkastellaan tässä yhteydessä, koska ne ovat perustana kosteyslaskennalle. Kuvassa 74 on esitetty katon kenttätutkimuksessa mitattu ja laskennallinen lämpötila korkeuksilla A, B ja C.



Kuva 74. Tulokset mittapisteen 6 lämpötiloista ja laskennallisesti määritetyt lämpötilat mitatuilla reunaehdoilla ajanjaksolla 27.6–29.6.2011 (Comsol Multihysics).

Katon kosteusliikkeen mallinnus päivätarkkuudella

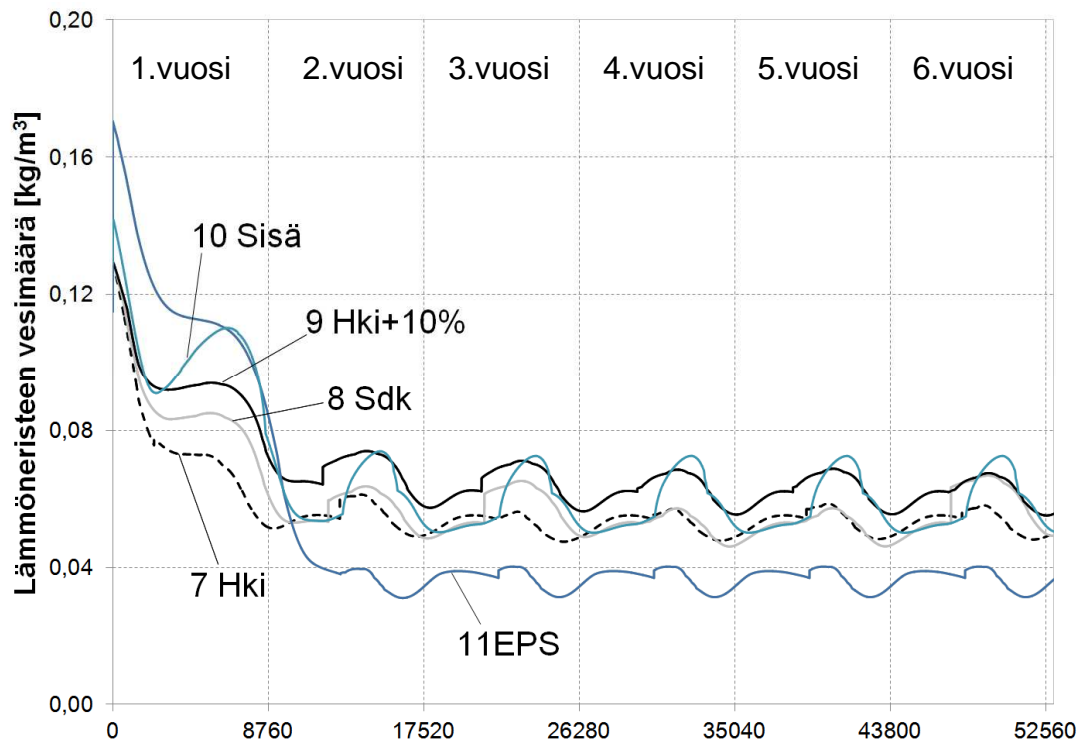
Päivätarkkuuden kosteyslaskennassa tarkasteltiin katon lämmöneristeen päivittäisiä suhteellisia kosteuksia ja auringonsäteilyn vaikutusta niihin. Kuvassa 79 on esitetty korkeudella A laskettuja (laskentamallit 1 - 6) suhteellisia kosteuksia kesäaikana sekä vertailuna kenttätutkimuksen mittapisteen 6 suhteellinen kosteus. Liitteessä 5 on esitetty tulokset korkeuksilta B ja C.



Kuva 79. Tuloksia suhteellisen kosteuden laskennasta A-korkeudella laskentamalleilla 1 - 6 (Comsol Multiphysics). Mit(6A) on kenttämittauksessa mitattu suhteellinen kosteus alueella 3. Kuvan ajanjakso on 26.6 12:00–28.6 6:00. Korkeuksien B ja C tulokset on esitetty liitteessä 5.

PVC-katon kuivuminen pitkällä aikavälillä

Kuvassa 80 on esitetty laskentamallien 7 - 11 tulokset lämmöneristeen kosteusmäärästä.



Kuva 80. PVC-katon hygroskooppisen kosteuden kuivuminen (RH alussa 97 %) 6 laskentavuoden aikana (Wufi 4). Laskentamallit 7 - 11 on kuvattu taulukossa 31.

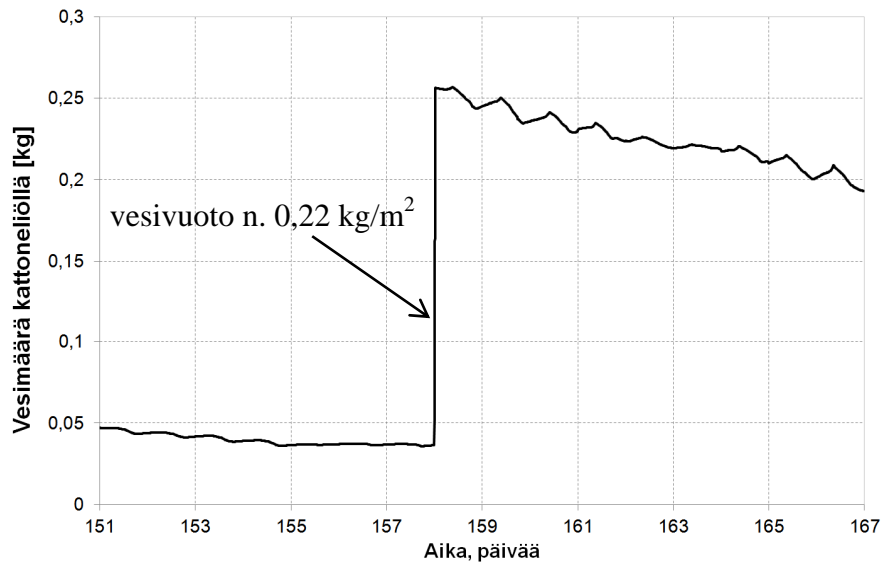
Kuvan 80 mukaisessa kuivumisessa rakenteesta kuivuu kosteutta taulukon 32 mukaisesti.

Taulukko 32. Wufi-laskennan perusteella ensimmäisen laskentavuoden aikana kuivunut kosteusmäärä [kg/m²] laskentamalleilla 7 - 11.

	7	8	9	10	11
Kuivuva kosteusmäärä [kg/m ² /a]	0,08	0,06	0,06	0,05	0,04

Uratuuletuksen kuivatuskky

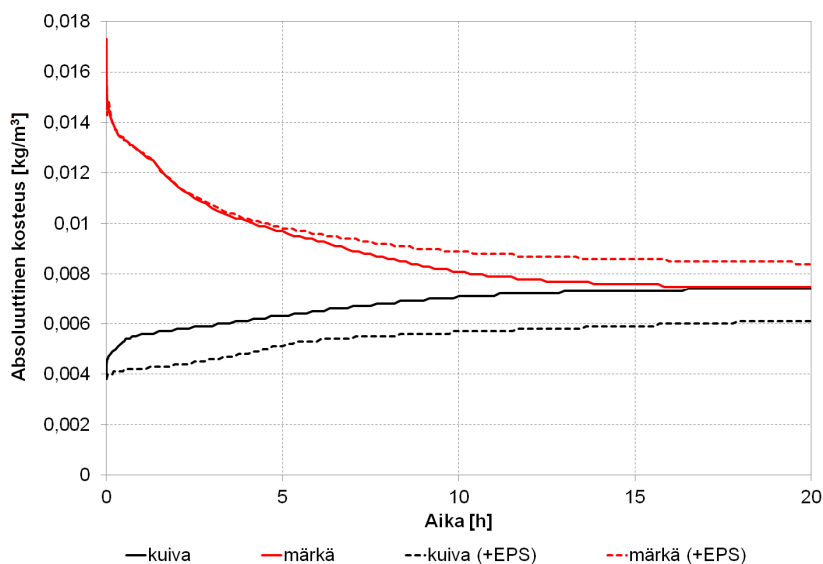
Kuvassa 81 on esitetty laskentamallin 12 tulos uratuuletetun katon kuivumiskyvystä ajalta 1.6–17.6. Alkutilanteessa lämmöneristeen suhteellinen kosteus on 50 %, jonka jälkeen kattoon lisätään vuotovesi. Katon kosteusmäärä nousee 0,04 kilosta 0,256 kiloon neliölle. 9,4 päivän aikana tuuletus poistaa kosteutta 0,0578 kiloa neliöltä. 90 kesäpäivän aikana katosta poistuisi yhteensä 0,554 kiloa kosteutta. Muina aikoina vuodesta kosteudenpoistokky ei ole laskentamallissa näin suuri.



Kuva 81. Uratuuleetus kuivattaa kastunutta kattoa kuvan tapauksessa 6,15 grammaa päivässä. (Comsol Multiphysics).

Kosteuden pystysuora liike

Kuvassa 82 on esitetty kosteuden pystysuoran liikkeen laskennan tulokset. Punainen käyrä kuvaa kuinka absoluuttinen kosteuspitoisuus lämmöneristeen huokosilmassa alenee vähitellen kohti tasapainotilaa. Musta käyrä kuvaa kuivan lämmöneristeen absoluuttisen kosteuspitoisuuden nousua, mutta muutos ei ole yhtä suuri kuin lämmöneristeen alaosassa, koska suurin osa eristeestä oli kuivaa laskennan alussa.



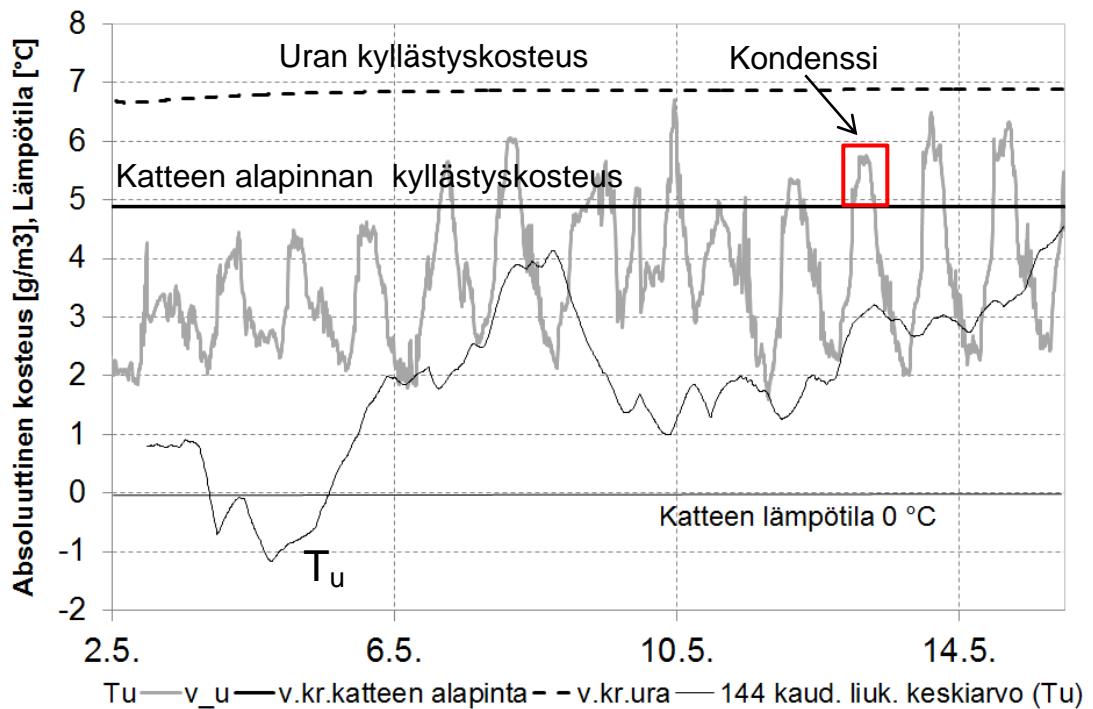
Kuva 82. Lämmöneristeen sisällä tapahtuva kosteuden tasaantuminen diffuusiolla kuvan 15 rakenteessa. Katkoviivalla on esitetty tulokset, kun rakenteessa on tasaantumista hidastava EPS-kerros. (Comsol Multiphysics).

Uratuuletuksen kondensoimisherkkyys

Uratuuletuksen kondensoi ajanjaksolla 1.10–30.3 kosteutta noin $6,2 \text{ g/m}^2$, kun samalla aikavälillä uratuuletus poisti rakenteesta 130 g/m^2 .

Kevätkondenssin mahdollisuus

Kuvassa 83 on esitetty katon lämmöneristeen kyllästyskosteus katteen alapuolella ja tuuletusuran syvyydellä sekä ulkoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus ajanjaksolla 2.5–15.5 Sodankylän olosuhteissa.



Kuva 83. Kevätkondenssi tilanne syntyy, kun katteen lämpötila pysyy alhaisena ulkolämpötilan noustessa. Katteen lämpötila on 0 °C niin kauan, kun katolla on sulavaa lunta. Ennen sulamista lumi toimii lämmöneristeenä ja katteenlämpötila on yli ulkoilman lämpötilan (tilanne ennen kuvaa).

7.4 Tulosten tarkastelu

Lämmönsiirtymisen laskenta

PVC-katon lämpötilat onnistuttiin määrittämään laskennallisesti tarkkaan. Laskennan tulokset vastaavat mitattuja lämpötiloja. Lämpötilalaskenta ei eroa eri laskentamallien välillä, muuten kuin lämmöneristeen materiaaliominaisuuksien suhteen. Tulosten tulokinnassa on huomioitava, että koska lämpötekninen laskenta onnistui tarkasti, tuloksien erot johtuvat kosteusteknisistä materiaaliominaisuuksista tai kosteuskonvektiosta. Las-

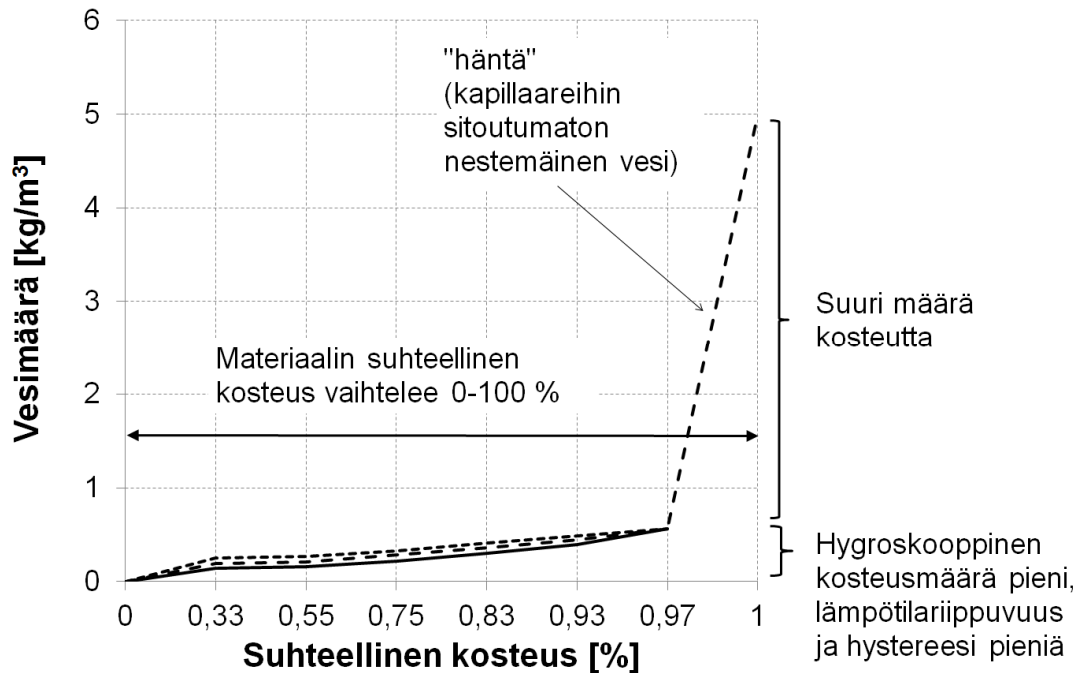
kentamallit eivät huomioi konvektiota, mitä voi PVC-katossa syntyä esimerkiksi pumpausvaikutuksesta.

Katon kosteusliikkeen mallinnus päivätarkkuudella

Laskentamallin 2 (kuvassa 79 käyrä 2) suhteellinen kosteus on selvästi korkeampi, kuin muilla laskentamalleilla. Tämä viittaa siihen, että sorptiokäyrän mallinnuksessa on käytettävä 97 - 98 %:ssa mitatun hygroskooppisen kosteusmäärän lisäksi suurempaa arvoa, ”höntää”, kun suhteellinen kosteus on 100 %. Ilman höntää suhteellinen kosteus nousee rajapinnoilla suhteettoman suureksi. Korkeudella C suhteellinen kosteus on yli 100 %, kun sorptiokäyrässä ei ole höntää (liite 5). Hönnäksi valittiin kosteusmäärä 5 kg/m³ suhteellisella kosteudella 100 % (kappale 7.2.2). Laskentaohjelmia käytettäessä on huomioitava, että Wufi generoi hönnän automaattisesti, mutta Comsol Multiphysicsissä höntä on syötettävä ohjelmalle osana sorptiokäyrää.

Laskentamalli 3 eli lämpötilariippuva tasapainokosteuskäyrä oli korkeuksilla A ja B tyydyttäviä tuloksia ja jossain määrin jopa parempia kuin muut mallit. Korkeudella C ei ollut merkittäviä eroja mallien välillä. Jos 60 °C ja 40 °C:een sorptiokäyrien alhaisten suhteellisten kosteuksien arvoja alensi entisestään malliin 3 verrattuna, niin kuvan 79 hetkellinen alenema kastumisvaiheen käyrässä ulottui aina mitatun suhteellisen kosteuden tasolle, mutta tätä paremmin mallia ei saatu toimimaan. Laskentamallit 4 ja 5 eivät parantaneet laskennan toimivuutta. Voimakkaan hystereesin tapauksessa laskennassa esiintyi tiheää sahaamista, mutta laskenta oli pitkällä ajalla stabiili. Hystereesin ja lämpötilariippuvan sorptiokäyrän vähäinen vaikutus materiaalin kosteustasapainoon on esitetty kuvassa 84.

EPS eristetyssä laskentamalleissa 6 ja 6B suurin ero materiaaliominaisuuksissa kiviviliaan verrattuna on suurempi vesihöyrynvastus ja terminen diffusiviteetti. A korkeudella laskentamalleissa 6 ja 6B suhteellinen kosteus vaihteli päivän aikana 55 %, kun malleissa 1 - 5 vaihtelu oli 75 %. B korkeudella suhteellisen kosteuden vaihtelu päivän aikana oli EPS mallissa 35 %, kun se oli malleissa 1 - 5 kivivillalla 60 %. Jos EPS mallin laski kivivillan termisellä diffusiviteetillä, vaihtelu oli B korkeudella vain 20 %. Liitteessä 5 on kuva B korkeuden laskentatuloksista. EPS:n kivivillaa suurempi terminen diffusiviteetti lämmittää kattoa syvemmälle auringonpaisteella, mikä alentaa suhteellista kosteutta. C korkeudella suhteellinen kosteus vaihteli laskentamalleissa 6 ja 6B vain 6 - 8 % ja laskentamalleilla 1 - 5 vaihtelu oli 25 - 35 % päivän aikana. EPS:llä suhteellinen kosteus vaihtelee päivän mittaan eristeen eri korkeuksilla vähemmän kuin kivivillalla, mutta EPS:n suurempi terminen diffusiviteetti suurentaa suhteellisen kosteuden vaihtelua. Kivivillan vesihöyrynvastuksena käytettiin yhdessä laskennassa lämpötilariippuvaa arvoa, mutta tämä ei vaikuttanut tuloksiin, sillä riippuvuus on pieni (kuva 26).



Kuva 84. Materiaalin hygroσκοoppisuus on pääasiassa riippuvainen suhteellisesta kosteudesta. Laskennallisesti tasapainokosteuden hystereesin ja lämpötilariippuvuuden pienen vaikutuksen selittää sorptiokäyrän "häntä".

Tuloksien perusteella PVC-katon laskentamallissa sorptiokäyränä voidaan käyttää adsorptio- ja desorptiokäyrien keskiarvoa. Monimutkaisemmat mallit eivät anna laskennassa ratkaisevasti tarkempia arvoja. Joissain tilanteissa lämpötilariippuvuus voi kuitenkin olla laskennallisesti merkittävä, esimerkiksi jos rakenteessa on puuta.

Päivätarkkuuden laskennassa oli usein laskennallisia ongelmia, kun eristeen kosteus­määrän laskennan alussa asetti korkeaksi (yli 85 %), koska PVC-katossa on tiivis kate verrattuna lämmöneristeeseen. Ongelmaksi muodostuu katon yläpinnan suuri kosteus­pitoisuus, minkä vuoksi laskenta antoi helposti yli 100 % suhteellista kosteutta. Laskenta­ongelmia oli myös laskennan alkuvaiheessa, koska materiaalien kosteus­pitoisuus erosi merkittävästi siitä, mihin suuntaan laskenta kosteutta vei rakenteessa. Kun ulkolämpötilan laskennan alussa nosti $-5...0\text{ }^{\circ}\text{C}$ tasolle, laskenta alkoi toimia, joten laskennan alkamisajankohta voi vaikuttaa laskennan toimivuuteen. Wufissa laskenta laski päivätarkkuuden reunaehdoilla väärin, ja lämmöneristeen kosteus­määrä alkoi kasvaa vuosien mittaan. Laskentaongelmat johtuivat todennäköisesti voimakkaasta auringonsäteilystä ulkopinnalla ja materiaalien kosteudenläpäisevyyksien suuresta erosta. Wufi-laskenta toimi oikein pitkän ajanjakson laskentamalleissa, kun reunaehdoiksi asetti sinikäyrän mukaiset tasaiset arvot. Myös aiemmin mainittu sorptiokäyrän loppupään kapasiteetti vaikuttaa laskentatuloksiin ja laskennan oikeellisuuteen.

PVC-katon kuivuminen pitkällä aikavälillä

Hygroσκοoppinen kosteus määrä kuivuu katosta parin ensimmäisen vuoden aikana, mikä vastaa stationääritilan laskentaa aiemmin. Talvella kuivuminen hidastuu merkittävästi. Jos sisäilman kosteus on korkea (laskentamalli 10) niin kuivuminen on yhtä nopeaa, mutta lämmöneristeen kosteuspitoisuudessa esiintyy vuosittain suurempaa vaihtelua kuin laskentamalleissa 7, 8, 9 ja 11. Kuivumisnopeus on laskennan perusteella hitaampi kuin kappaleessa 5.6.2 esitettiin. Aikariippuva laskenta antaa hitaamman kuivumisnopeuden, mutta kuivumisaika on kuitenkin lyhyt, koska hygroskooppinen kosteus määrä on alhainen.

Uratuuletuksen kuivatuskyyky

Uratuuletuksen poistama kosteus määrä 0,55 kg 90 kesäpäivän aikana on vähemmän, kuin mitä laskettiin kappaleessa 6.3.2, jonka mukaan kosteudenpoistokyyky on vastavilla oletuksilla 1,5 kg vuodessa. Lähteessä [16] esitettiin uratuuletuksen kuivatuskyykyksi 2 kg 80 kesäpäivän aikana. Laskennassa käytetty menetelmä uratuuletuksen mallinnuksesta negatiivisena kosteuslähteenä ei välttämättä toimi täysin oikeanlaisesti.

Kosteuden pystysuora liike

Lämmöneristeen sisällä tapahtuva diffuusio tasaannuttaa eristeen huokosilman kosteuden noin 20 tunnin aikana. Kun lämmöneristeessä on EPS-kerros, hidastuu diffuusio merkittävästi ja tasaantuminen kestää noin 5 päivää. Diffuusionopeus pidemmällä matkalla voidaan arvioida suuntaa antavasti kertomalla diffuusion kulunut aika verrattavan tarkastelun matkan ja lasketun matkan, 230 mm, osamäärällä. Tämän perusteella kosteuden tasaantuminen diffuusiolla eristeessä katon suuntaisesti kestää metrien matkalla kymmeniä päiviä. PVC-katossa tämä tasaantuminen saattaa olla merkittävästi nopeampaa katteen alla olevan ilmatilan ansiosta, mutta kyseessä on tällöin tasaantuminen konvektiolla.

Kuvasta 82 voidaan arvioida myös pienempien vesihöyrynpitoisuuserojen tasoittumisaikaa. Parin gramman pitoisuusero tasaantuu suurimmalta osaltaan noin 5 tunnissa. Kattojen lämmöneristeissä vesihöyrynpitoisuuserot eri korkeuksilla ovat melko matalia, johtuen juuri diffuusion nopeudesta.

Uratuuletuksen kondensoimisherkkyyys

Uratuuletuksen kondensoimisherkkyyys on vähäinen, sillä ajanjaksolla 1.10–30.3 kondensoitua kosteus määrä oli noin 6,2 g/katto-m², kun samalla aikavälillä uratuuletus poisti rakenteesta 130 g/katto-m². Uratuuletuksen kosteudenpoistokyyky on talvella alhainen, mutta urien mukana ei myöskään talven aikana siirry kosteutta kattoon.

Kevätkondenssin mahdollisuus

Ulkoilman kosteuspitoisuus ylittää katteen alapinnan kriittisen kosteuspitoisuuden noin 1 g/m³:lla. Kondensoitua kosteus määrä on hyvin pieni ja poistuu todennäköisesti nope-

asti katosta. Kosteusmäärän laskenta ei ole tarkasti mahdollista, sillä katteen alapuolen ilmanvaihtuvuudesta, missä kondenssi voi tapahtua, ei ole tietoa.

8 Johtopäätökset

PVC-katon kuivumiskykyä ja kosteusteknistä toimintaa tutkittiin kenttätutkimuksessa Sipoossa ajalla 17.6–9.1.2011. Kenttätutkimuksessa mitattiin aikavälillä 17.6–28.12.2011 kosteutta ja lämpötilaa logistiikkakeskuksen katolle ajanjaksolla 15.4–24.4.2011 rakennettujen pinta-alaltaan 198 - 400 m² kattoalueiden lämmöneristeestä, joiden kantavana rakenteena oli ontelolaatta tai poimulevy ja lämmöneristeenä 230 mm kivivillaa. Kivivillan sitoma kosteus määrä 97 % suhteellisella kosteudella on noin 0,56 kg/m³. Katteena oli tummanharmaa 1,2 mm paksu PVC-kate. Tutkimusalueita oli yhteensä 5, joista 3 oli tuulettamattomia, yksi tuuletusurilla ja kahdella 160 mm alipainetuulettimilla tuuletettu ja yksi 110 mm alipainetuulettimilla tuuletettu umpivillainen katto. Uratuuletetussa katossa 20 x 30 mm² uria oli 4,5 kpl metrin leveydellä, virtausmatka kokoojakanavien välillä oli 18 m ja alipainetuulettimia oli yksi kummassakin 8 m pitkässä kokoojakanavassa. Umpivillaisen tuuletetun katon virtausmatka oli 13,6 m. Poimulevykatto oli tuulettamaton. Ulkoilman absoluuttinen kosteus oli mittauksien aikana 1 - 2 g/m³ korkeampi kuin Helsingissä keskimäärin vastaavana ajankohtana. Tutkimusalueiden rakennuskosteus oli alhainen, mutta tuuletetulla umpivillaisella ja yhdellä tuulettamattomista alueista oli vettä jiirissä 2 cm kerros 80 cm leveydellä. Kattoneliölle suhteutettuna kosteus määrä oli 0,35 kg/m². Näillä alueella rakentamista edeltänyt sademäärä oli 1,7 mm, josta 20 % jäi katon rakennuskosteudeksi. Rakennusvaiheen kosteudenhallinnassa käytettiin sääennusteita ja -suoja. Lisäksi vesi puhallettiin höyrynsulun päältä kattokaivoihin.

Rakennuskosteus 0,35 kg/m² ei kuivunut kastuneilta alueilta tutkimusaikana, joka päättyi 8 kuukautta rakentamisen jälkeen. Alipainetuuletus ilman tuuletusuria lämmöneristeessä ei toiminut tehokkaasti, sillä ilmavirtaus huokosissa oli vähäistä. Laskennallisesti ilmanvirtaus todettiin noin 100 kertaa alhaisemmaksi kuin uratuuletetussa katossa. Laskennassa käytettiin ilman nopeutena urassa 0,01 m/s ja urien pinta-alana uritetun alueen mukaisia arvoja, alipainetuulettimien välisenä paine-erona 1 Pa, huokosvirtauksen matkana 13,6 m, ja virtauspinta-alana 50 mm korkuista kivivillalevyä. Kummatkin alueet kuivuivat käytännössä diffuusiolla, mikä ei ollut tarpeeksi tehokasta kuivattamaan alueita 8 kuukauden aikana. Tuulettamattoman alueen, jossa oli rakennuskosteutta, pinta-ala oli 400 m². Alue siirsi kosteutta jiiristä tehokkaammin muualle lämmöneristeeseen kuin toinen kastunut alue, jonka pinta-ala oli 198 m². Tämä havaittiin selvästi korkeampina suhteellisina kosteuksina 400 m²:n alueella etäällä jiiristä kuin 198 m²:n alueella. Pienemmällä alueella oli enemmän katteen ylösnostoja, mikä vähentää katteen hulmuamista tuulenpaineen vaikutuksesta. Tuulettamattomassa katossa on tuloksien perusteella hyvä olla mahdollisimman suuria yhtenäisiä alueita. PVC-katteen hulmuamisilmiö havaittiin mittausaluiden viereisellä suurella katolla. Mittausalueilla tuulennopeus oli 0,7–1,5 m/s ajanjaksolla 17.6–23.9. Tuulennopeus suurella katolla oli arviolta tätä korkeampi. Kummallakin kostealla alueella rakennuskosteus tiivistyi ja jäättyi lämmöneristeen yläosiin lokakuusta eteenpäin. 198 m² laajan alueen jiiristä mitattiin 1 °C alempi lämpötila kuin kuivasta jiiristä, joten kapillaarialueella oleva kosteus saattoi alentaa eristeen lämmöneristävyyttä. Tulokseen aiheuttaa kuitenkin epävarmuutta lämpötila-anturin mahdollisesti huono toimivuus jiirin kosteissa oloissa.

Uratuuletetun tutkimusalueen rakennuskosteus oli alhainen ja mittauksien alkaessa 2 kuukauden päästä rakentamisesta, ei tutkimuksen aikana havaittu alueen kuivumista. Uratuuletuksen kompaktikaton kuivumiskykyä lisäävä vaikutus on kuitenkin todettu luotettavasti lähteessä [9]. Kenttätutkimuksessa uratuuletetun alueen absoluuttiset ja suhteelliset kosteudet olivat kaikista alueista alhaisimpia ja alueen absoluuttinen kosteus oli selvästi ulkoilmaa alempi, johtuen uratuuleuksesta. Rakennuskosteudeltaan vastavassa poimulevykatossa absoluuttinen kosteus oli noin $1,5 \text{ g/m}^3$ uratuulettua aluetta korkeampi. Uratuuletuksen ei havaittu siirtävän kosteutta rakenteeseen kondensoimalla, mutta tammikuussa alipainetuulettimesta todettiin silmähavaintoon perustuen siirtyneen kattoon hyvin pieni määrä lunta.

Tuulettamattomalla poimulevyllisellä alueella ei ollut rakennuskosteutta. Alueen kuivumiskyky diffuusiolla oli tällöin riittävä. Alueen alapuolinen tila oli 8 metriä korkea ja poimulevyn päälle asennetussa höyrynsulussa oli reikiä ja epätiivitä saumoja, mutta alueella ei havaittu kosteuden konvektiovirtausta sisäilmasta joulukuun aikana, jolloin sisäilman absoluuttinen kosteus oli 1 g/m^3 katon lämmöneristettä korkeampi.

Yhdessä tuulettamattomista alueista havaittiin kosteuden kertyneen alueen varjoisaan yläosaan. Alueen alaosan suhteellinen kosteus oli syyskuussa 70 %, mutta 17,5 m etäisyydellä alueen varjoisassa yläosassa suhteellinen kosteus oli 100 %. Lämmöneristeessä oli tämän perusteella hygroskooppista kosteutta alueen alaosassa $0,06 \text{ kg/m}^2$ ja yläosassa $0,13 \text{ kg/m}^2$. Kosteusmäärä yläosassa vastasi olosuhteita kosteiden tutkimusalueiden jirissä. Kosteus siirtyi katon sisällä, kun auringonpaisteesta katon alaosan lämmöneriste luovutti huokospinnoille sitoutuneen kosteuden huokosilmaan, ja tämä kosteus siirtyi katteen alapuolella katteen hulmuamisen aiheuttaman ilmavirtauksen, pumppausvaikutuksen ja diffuusion seurauksena. Siirtynyt kosteus ei tasaantunut tutkimuksen aikana. Auringon säteilyn vaikutus kosteudensiirtymiseen tulee huomioida katoilla, joissa on varjoisia alueita ja katoilla, jotka geometriansa puolesta lämpiävät eri alueilla eri aikaan. Auringonsäteilyn aiheuttamaa kondenssia pahentaa keväällä se, jos kosteus siirtyy alueelle, missä katto muuttuu jyrkästä loivaksi, esimerkiksi kupolikatoissa, sillä loivalla alueella voi olla vielä lunta. Tässä tilanteessa loiva alue on termisesti jyrkkää aluetta jäljessä ja kondensoi herkästi siirtyvät kosteusmäärät. Harjakatoilla ja kupolikatoilla tuulettamaton lämmöneriste voi olla toimivampi vaihtoehto kuin uratuuletettu, sillä umpivillassa kosteudenliikkeet ovat auringon säteilyn seurauksena hitaampia. Solumuovisella lämmöneristeellä voidaan vähentää kosteudensiirtymistä alhaisemman vesihöyrynläpäisevyyden ja ilmanläpäisevyyden vaikutuksesta. Myös katteen löysyys ja kiinnitystiheys vaikuttaa sen alapuolella tuulisella säällä esiintyviin ilmavirtauksiin, joten kate tulisi olla näissä tapauksissa tiukemmin ja tiheämmin kiinnitetty. Katon lämpenemistä auringonpaisteesta on mahdollista alentaa 10 °C vaaleammalla PVC-katteella tummanharmaaseen verrattuna, jolloin kosteudenliikkeet katossa ovat pienempiä. Sisäpuolisten lämpökuormien vaikutusta voidaan vähentää termistä massaa omaavalla kantavalla rakenteella kuten betonilaatalla. Jos kosteudensiirtymistä katon lämpötilaerojen vaikutuksesta ei voida estää, on perusteltua käyttää vesitiivistä höyrynsulkua vesivalumiin estämiseksi.

Kenttämittauksissa suhteellinen kosteus vaihteli auringonpaisteella voimakkaasti lämmöneristeen ylä- ja alapinnassa. Lämpivä kivivilla luovuttaa kosteutta, joka siirtyy

diffuusiolla alemmas eristeessä. Auringon säteilyn loputtua kosteus tasaantuu eristeessä. Pilvisinä päivinä absoluuttinen ja suhteellinen kosteus on eristeen eri korkeuksilla lähes yhtä suuria, joten hygroskooppisella alueella oleva kosteus on kesällä tasaisesti jakaantunut eristeessä. Suhteellisen kosteuden voimakas muuttuminen auringonpaisteella on huomioitava katon kosteusmittauksessa, sillä se voi muuttua jopa kymmeniä prosentteja tunnin aikana. Kesällä katon kosteusmittaus tulee suorittaa pilvisellä säällä tai yöaikaan. Talvella kosteusmittaus ei ole suositeltavaa, koska suurin osa kosteutta on rakenteen yläosassa ja katteen alapinnassa, mikä vaikeuttaa tulosten tulkintaa. Kosteuden pysyvuora liike aiheutti kondensoitumista eniten kuivalla uratuulettutulla alueella, mikä osoitti että kosteuden kondensoituminen ja valuminen on mahdollista hygroskooppisella kosteusalueella olevassa katossa.

Kenttäkokeiden perusteella diffuusio ei riitä kuivattamaan rakennuskosteutta 8 kuukauden aikana. Uratuuletus alentaa lämmöneristeiden absoluuttisen kosteuden ulkoilman kosteutta alemmaksi. Kosteus liikkuu PVC-katon lämmöneristeessä voimakkaasti joka suunnassa. Talvella kosteudenliikkeet loppuvat. Kenttäkokeen tulokset pätevät tarkalleen vain kyseiseen kattoon. Tutkimusalueiden koko on pienempi kuin kattopinnat yleensä, mitä saattaa alentaa katteen hulmuamisen aikaansaamaa kosteudensiirtymistä lämmöneristeessä. Tutkimusalueita reunusti yhdellä sivulla tumma peltielementtiseinä, joka saattoi jossain määrin vaikuttaa alueiden lämpötiloihin. Lämpötilat olivat kuitenkin katteen pinnassa lähteen [28] mukaisia. Tutkimusalueiden katon rakennustyö oli huolellista, jonka seurauksena kattojen rakennuskosteudet jäivät alhaisiksi.

PVC-kattoon siirtyvät kosteusvirrat diffuusiolla sisäilmasta olivat käsinlaskennan perusteella alhaisia, enintään $0,17 \text{ kg/m}^2$ vuodessa. Suurin diffuusiiovirta laskettiin sisäilman olosuhteilla 30°C ja 90 % ja lämmöneristeiden olosuhteilla 15°C ja 68 %. Sisäilma kuivasti hyvin kosteaa tilaa ja eristeiden kosteus määritettiin kenttätutkimuksen perusteella kuivan ja kostean alueen tuloksien keskiarvona. Höyrynsulkuna laskennassa oli polyeteenikalvo.

Kosteuskonvektion suuruusluokkia höyrynsulun saumoista, höyrynsulun rei'istä ja rakovirtauksesta arvioitiin analyttisillä laskentakaavoilla paine-eroilla 5 - 30 Pa. Suurimmat kosteusvirrat syntyvät rakovirtauksesta, jossa kosteusvirta voi vuodessa olla 5 - 30 Pa paine-erolla jopa 28 - 168 kg. Höyrynsulun rei'istä vastaava kosteusvirta on 12 - 30 kg ja saumoista 0,3 - 1,3 kg. Reunaehdot olivat samat kuin diffuusio tarkastelussa, mutta eristeiden lämpötila oli 20°C . 15°C :een lämpötilalla esitetyt kosteusvirrat nousevat 15 %. Kosteuskonvektio on tarkastelujen perusteella suurinta rakovirtauksessa ja höyrynsulun reikien kautta, mutta saumojen läpi virtaa verraten vähän kosteutta. Kenttätutkimuksessa poimulevykaton alapuolisesta tilasta ei havaittu joulukuussa kosteuskonvektiota höyrynsulun saumoista tai lävistyksistä, joita yläpohjassa varmuudella oli. Paineero yläpohjaan oli luokkaa 5 Pa joulukuun keskimääräisellä lämpötilaerolla $12,5^\circ\text{C}$ olettamalla vaippa avonaiseksi alaosaan, sillä ilmanvaihtokonehuoneen alaosaan oli ovi auki koko mittausjakson ajan. Pienellä paine-erolla ja sisäilman kosteuslisällä 1 g/m^3 siirtyvät kosteusmäärät ovat pieniä.

Vesivuotojen suuruusluokkia arvioitiin analyttisellä kaavalla, jonka perusteella $20 \times 1 \text{ mm}^2$ vuotoaukon kautta siirtyväksi kosteusvirraksi 5 cm:n vesikerroksella laskettiin 0,7

kg/min. Vuotokokeella todettiin, että vuotokaava ei huomioi lämmöneristeen virtausvastusta, ja että todellinen vuotomäärä on 10 kertaa laskennallista pienempi. Katevauriot ovat vaarallisimpia katon jiirissä, missä vesi lammikoituu, ja sen kerrospaksuus kasvaa helposti korkeaksi. Vesivuodot siirtävät kattoon nopeasti paljon kosteutta, jonka kuivatus lyhyessä ajassa on mahdollista vain uratuuletuksella.

Katon rakennuskosteuden kuivumiskyky diffuusiolla ulkoilmaan on käsinlaskennalla $0,23 \text{ kg/m}^2/\text{a}$. Laskennassa katteen alapuolinen lämpötila ja suhteellinen kosteus olivat 17°C ja 80 %, mitkä ovat keskiarvot kenttämittauksen kosteilta alueilta kesä-marraskuulta. Ulkoilman olosuhteet olivat Helsingin keskiarvoja huhti-marraskuulta, $9,3^\circ\text{C}$ ja 77 %. Katteen kuivumisessa diffuusiolla on otettava huomioon, että kosteilla-kin katoilla lämmöneristeen suhteellinen kosteus ei ole katteen alla kuin 80 %, mikä hidastaa diffuusiolla tapahtuvaa kuivumista. Kuivumisnopeus vastaa aiemmassa tutkimuksessa esitettyä arvoa $0,2 - 0,3 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ [12]. Kuivumisnopeus riippuu vuodon leviämisestä jiirin pohjalla ja katteen hulmuamisen aiheuttamien ilmapirtauksien voimakkuudesta. Kuivuminen diffuusiolla tapahtuu joka tapauksessa hitaasti.

Uratuuletuksen kosteudenpoistokyvyn enimmäisarvoksi vuodessa määritettiin $1 - 16 \text{ kg/m}^2$. Katon kuivumisnopeus on uratuuletuksella merkittävästi suurempi kuin pelkällä diffuusiolla. Kuivumisnopeus uratuuletuksella määritettiin olettamalla, että uraan virtaava ulkoilma lämpenee uran lämpötilaan ja kyllästyy lämmöneristeestä siirtyvästä vesihöyrystä ennen virtausta ulkoilmaan. Uran lämpötilaksi ja ulkoilman kosteudeksi oletettiin kenttätutkimuksessa 10 minuutin välein mitatut arvot heinä-marraskuussa, ilman virtausnopeudeksi $0,01 - 0,3 \text{ m/s}$, kokoojakanavien etäisyydeksi $10 - 30 \text{ m}$ sekä tuuletusurien kooksi ja määräksi kenttätutkimuksen uratuuletettua aluetta vastaavat arvot. Keskimääräinen kuivatuskyky on luokkaa $1,5 \text{ kg/m}^2$ vuodessa nopeudella $0,05 \text{ m/s}$ ja kokoojakanavien etäisyydellä 20 m . Suurempaa kokoojakanavien etäisyyttä ei suositella käytettäväksi ja $10 - 15 \text{ m}$ väliä käytetään, jos sisäilma on kosteaa tai rakennus on suuri [8]. Virtausnopeus $0,05 \text{ m/s}$ on keskiarvo urista mitatuista nopeuksista [16]. Uratuuletuksen poikkipinta-ala katoneliölle oli 2700 mm^2 , kun muissa tutkimuksissa on käytetty $3000 - 4000 \text{ mm}^2$ uritusta [8 & 16]. Aiemmissä tutkimuksissa on esitetty kuivumiskyvystä arvot $2 - 20 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ [12] ja $2 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ [5]. Ilman lämpiäminen uran lämpötilaan osoitettiin laskennallisesti, mutta ilman kosteuden nousemisesta 100 % asti ei ole tutkimuksia. Laskennalliset kosteusmäärät ovat siitä syystä enimmäisarvoja. Toisaalta ulkoilman kosteus oli laskennassa Helsingin keskiarvoja korkeampi, mikä alentaa laskettua kuivatuskykyä.

Uratuuletuksen vaikutus katon lämpöhäviöön on laskennallisesti pieni, noin 1,5 % yläpohjan johtumishäviöstä. Laskenta tehtiin talvella ulkoilman lämpötilalla -10°C , sisälämpötilalla 21°C , uran lämpötilalla $-5,35^\circ\text{C}$, yläpohjan U-arvolla $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$, uran ilman virtausnopeudella $0,05 \text{ m/s}$ ja samalla urien pinta-alalla kuin kenttätutkimuksessa. Tulos vastaa aiempaa käsitystä uratuuletuksen aiheuttamasta lisälämpövirrasta, mikä on 0 - 5 % johtumishäviöstä [12], [15], [16].

Pumppausvaikutuksen kuivattava vaikutus arvioitiin yksinkertaistetusti kenttätutkimuksessa mitattuihin katon lämpötiloihin perustuen. 29.6 kivivillan keskimääräinen lämpötila muuttui 20°C katteen lämpötilan noustessa 61°C :een. Villan lämpötilamuutoksen

perusteella ilman tilavuus muuttuu eristeessä 7 %, ja kun lämmöneristeen yläosan kosteuslisä ulkoilmaan nähden oli 5 g/m^3 , kuljetti pumppausvaikutus kosteutta katosta yhden päivän aikana 0,081 g. Yhden kesän aikana siirtyvä kosteus määrä on alle 10 g/m^2 , joten pumppausvaikutus ei kuivata kattoa merkittävästi.

PVC-katon kosteusteknistä toimintaa mallinnettiin laskennallisesti Comsol Multiphysics 4.2 ja Wufi 4 -ohjelmilla. 6 vuoden laskentamallissa tuulettumattoman katon hygroskooppisella kosteusalueella (RH 97 %) oleva rakennuskosteus kuivui diffuusiolla vuodessa, jolloin kuivumisnopeus oli $0,05 - 0,08 \text{ kg/m}^2/\text{a}$. Solumuovisella lämmöneristeellä kuivumisaika on vajaa 1,5 vuotta ja kuivumisnopeus $0,04 \text{ kg/m}^2/\text{a}$. Solumuovieristeet eivät hidasta katon kuivumista merkittävästi, sillä kuivumisnopeus määrittyy PVC-katteen vesihöyrynläpäisevyydestä. Ulkoilman reunaehtoina käytettiin lämpötilalle ja kosteudelle Helsingissä ja Sodankylässä säätilastojen perusteella sinikäyrää. Helsingin reunaehdot olivat $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$, amplitudi $12,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $79,9+10 \%$, amplitudi 10% . Sodankylän reunaehdot olivat $-1 \text{ }^\circ\text{C}$, amplitudi $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $78,7 \%$, amplitudi 12% . Kuivumisnopeus ei riippunut paikkakunnasta, sisäilman kosteuspitoisuuden noususta 90% :iin, tai Helsingin ulkoilman suhteellisen kosteuden nousemisesta 10% :lla. Höyrynsulkuna oli kenttätutkimusta vastaava bitumikermi. Käytännössä katon rakennuskosteus nostaa laskettuja PVC-katon kuivumisaikoja. Käsineläskennan perusteella $0,23 \text{ kg/m}^2$ rakennuskosteus lisäisi kuivumisaikoja vuodella. Kuivumisaikojen riittävyys diffuusiolla tapahtuvassa kuivumisessa riippuu lämmöneristeen kosteudenkestävyydestä ja siitä, kuinka paljon vesivalumia hyväksytään tapahtuvan. Kivivilla kestää kosteutta hygroskooppisella alueella ja joitain aikoja jopa kapillaarialueella, mutta kivivillan pitkäaikaiskestävyyttä tulisi selvittää lisää. Yläpohjan painesuhteet vaikuttavat mikrobien mahdollisuuteen siirtyä sisäilmaan. PVC-katon kosteusliikkeet lisäävät valumien todennäköisyyttä.

Laskentaohjelmalla mallinnettiin PVC-katon kosteuskäyttäytymistä aurinkoisena kesäpäivänä kenttätutkimuksen reunaehdoilla. Mallinnuksella päästiin tyydyttäviin tarkkuuksiin katon suhteellisesta kosteudesta lämmöneristeen eri korkeuksilla. Lämmöneristeen pinnassa laskenta antoi keskimäärin auringonpaisteella suhteellisen kosteuden 26% , kun mitattiin 17% , uran syvyydellä 37% , kun mitattiin 23% ja lämmöneristeen alapinnassa yöllä 68% , kun mitattiin 78% . Yhdessä tarkastelussa huomioitiin lämpötilariippuva sorptiokäyrä ja toisessa hystereesin vaikutus sorptiokäyrään. Lämpötilariippuvuus huomioitiin neljällä eri lämpötila-alueella perustuen $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $23 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa mitattuihin hygroskooppisiin kosteusmääriin. $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $60 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilojen käyrät määritettiin siten, että sitoutunut kosteus määrä aleni astetta kohden vastaavasti kuin laboratoriomittauksissa. Hystereesin adsorptio- ja desorptiokäyrät perustuivat vastaavasti laboratoriomittauksiin, joiden perusteella riippuvuus oli pieni, 75% kosteudessa $0,01 \text{ kg/m}^3$. Mallinnuksessa kokeiltiin myös suurempaa hystereesiä. Lämpötilariippuvan sorptiokäyrän laskentatulokset olivat parhaimmat, mutta tulokset eivät tarkentuneet mitattuihin kosteuksiin verrattuna oleellisesti. Tämän perusteella muut mallinnukset tehtiin yhdellä vain suhteellisesta kosteudesta riippuvalla sorptiokäyrällä. PVC-katon kosteuskäyttäytymistä arvioitiin EPS-eristetyssä katossa ja todettiin, että EPS-katoissa suhteellisen kosteuden vaihtelu aurinkoisella säällä on katon yläosassa 55% ja kivivillalla 75% . Katon alaosassa vaihtelu on EPS:illä $6 - 8 \%$ ja kivivillalla $25 - 35 \%$. Solumuovilla eristetyissä katoissa kosteuden pystysuora liike on kesällä vähäisempää kuin kivivillalla.

Uratuuletuksen kuivaava vaikutus huomioitiin lisäämällä tuuletus laskentaohjelmaan vastaavalla tavalla, kuin uratuuletuksista laskettiin käsinlaskennassa. Laskentaohjelmalla uratuuletuksen kosteudenpoistokyvyksi saatiin 0,55 kg 90 kesäpäivän aikana, mikä on vähemmän kuin käsinlaskennassa tai aiemmissa tutkimuksissa. Laskentamalli ei todennäköisesti toiminut täydellisesti vaan aliarvioi uratuuletuksen tehokkuutta.

Laskentaohjelmalla osoitettiin, että yön vastasäteilyllä ja kevätkondenssilla kattoon siirtyvät kosteusmäärät ovat pieniä. Tarkasteluissa laskettiin katon lämpötilaa katteen alla ja uran syvyydellä ja ulkoilman kosteus määräytyi kenttätutkimuksista. Ulkoilman kosteutta verrattiin katon kyllästyskosteuksiin. Ajanjaksolla 1.10–30.3 kondensoituva kosteus määrä oli 0,006 kg/m². Kevätkondenssia tarkasteltiin kvalitatiivisesti ja sen todennäköisyys todettiin pieneksi. Kondensoituminen on talviaikaan vähäistä, koska kylmällä ulkoilmalla ilman kosteussisältö on hyvin pieni.

PVC-katon kosteusteknisen toimivuuden varmistaminen edellyttää huolellista rakennusajan kosteudenhallintaa, jotta rakennuskosteuden määrä voidaan minimoida. Katon säännöllinen huolto on tärkeää, jotta estetään ylimääräisen veden pääsy lämmöneristekerrokseen rakennuksen käyttöaikana. Jos rakennuskosteuden määrä on korkea tai kattoon siirtyy kosteutta konvektiolla tai kattovuodoista, ei PVC-katon kuivumiskyky diffuusiolla yleensä riitä kuivattamaan kattoa. Konvektion estämiseksi höyrynsulun on oltava ilmatiivis. Uratuuletettu katto on tuulettamatonta kattoa toimintavarmempi ja höyrynsulun ilmatiivisyys on ehdoton edellytys myös uratuuletetussa katossa. Tuulettumatonta kattoa voidaan harkita käytettäväksi, jos rakennuksen sisäilma on kuivaa. Tuulettumaton katto voi poikkeustapauksissa olla uratuuletuksista toimivampi vaihtoehto esimerkiksi kupolikatoissa ja sisäilmaltaan kylmissä rakennuksissa, mutta erikoisten kattorakennetyyppien kosteusteknistä toimintaa olisi hyvä tutkia jatkossa. PVC-katon rakennesuunnittelussa ja materiaalivalinnoissa on huomioitava kattoon kohdistuvien lämpökuormien vaikutus kosteudensiirtymiseen.

9 Yhteenveto

Polyvinyylikloridilla (PVC) katetun loivan katon kosteusteknistä toimintaa ja erityisesti katon kuivumiskykyä tutkittiin kenttäkokeella ja laskennallisella tarkastelulla. Tutkimuksen taustalla oli epäselvyydet liittyen PVC-katon kosteustekniseen toimivuuteen ja kuivumiskykyyn. Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, onko diffuusio riittävä kuivumismekanismi, vai tulisiko PVC-katoissa käyttää tuuletusurallisia lämmöneristeitä, joita käytetään Suomessa esimerkiksi bitumikatteisissa katoissa. Osatavoitteena oli lisätä ymmärrystä PVC-katossa tapahtuvista kosteudenliikkeistä, jotta voidaan muun muassa arvioida PVC-kattojen ongelmatilanteisiin johtaneita syitä.

Kenttäkokeessa mitattiin jatkuvana mittauksena suhteellista kosteutta ja lämpötilaa Etelä-Suomessa Sipoossa sijaitsevan logistiikkakeskuksen PVC-katon lämmöneristeestä 5 tutkimusalueella. Mittaukset tehtiin lämmöneristeestä pinnasta, 60 mm syvyydeltä sekä alaosasta. Kolme aluetta oli tuulettamattomia, yksi alue oli uratuuletettu 160 mm alipainetuulettimilla ja yksi alue tuuletettu pelkillä 110 mm alipainetuulettimilla. Yksi tuulettamattomista katoista oli poimulevyrakenteinen ja muissa oli 400 mm paksu ontelolaatta. Lämmöneriste oli 230 mm kivivilla ja kate tummanharmaa PVC-kermi. Uratuuletettu alue oli kuivin kaikista tutkimusalueista. Uratuuletuksen kuivatusnopeutta ei voinut osoittaa kenttäkokeella alueen alhaisen rakennuskosteuden vuoksi, mutta uratuuletus laski alueen absoluuttisen kosteuspiitoisuuden alle ulkoilman, mitä ei tapahtunut muilla alueilla. Tuuletusuritus ei siirtänyt kosteutta kattoon. Tuulettamaton ja alipainetuulettimilla tuuletettu alue eivät 8 kuukauden tutkimusaikana pystyneet kuivaamaan alueiden rakennuskosteutta 0,35 kg vettä kattoneliölle. Tutkimus osoitti, että tuulettumaton PVC-katto on herkkä rakennusaikaiselle ja käytönaikaiselle kosteudelle. Uratuuletettu katto on toimintavarmempi ja pystyy poistamaan kosteutta nopeammin. Tutkimuksissa ilmeni, että katossa oleva ylimääräinen kosteus on jiirissä vetenä ja että suuret yhtenäiset kattopinnat siirtävät vettä jiiristä muulle katon alueelle katteen hulmutessa tuulessa. Lisäksi aurinkoisina kesäpäivinä kosteus siirtyy katon eristeessä katon aurinkoiselta alueelta varjoiselle alueelle ja tämän tietylle alueelle kerääntyneen kosteuden tasaantuminen diffuusiolla on hidasta. Kerääntynyt kosteus voi aiheuttaa vesivalumia, jos höyrünsulku ei ole vesitiivis. Kesäpäivinä myös kosteuden liike eristeen ylä- ja alaosan välillä on voimakasta, mikä vaikeuttaa kosteusmittauksien onnistumista. Kosteusmittaukset tulisi tehdä pilvisellä säällä tai yöaikaan. Kosteuden pystysuora liike johtuu katon yläosan lämmöneristeen luovuttaman kosteuden diffuusiosta alaspäin. Lämmöneristeen yläosan viilentyessä kosteus siirtyy takaisin ylöspäin. Lämpötilaerojen aikaansaamaa pysty- ja vaakasuoraa kosteudenliikettä voidaan alentaa esimerkiksi vaalealla PVC-kermillä tai solumuovisella lämmöneristeellä, muttei täysin estää. Jossain tapauksissa, esimerkiksi kupolikatoissa, tuulettamaton rakenne voi olla toimivampi, koska kosteus siirtyy tuuletusurissa tehokkaammin kuin lämmöneristeen huokosissa. Vaakasuora kosteuden kerääntyminen lämpökuormien vaikutuksesta tulee huomioida kattotyyppin, katteen kiinnityksen ja kantavan rakenteen valinnassa, mutta ennen kaikkea tulee varmistua höyrünsulun ilmatiiveydestä. Kosteuden kerääntyminen on sitä vähäisempää mitä kuivempi katto on. Lämpötilaerojen voimakas vaikutus rakenteiden kosteudenliikkeisiin tulee huomioida myös muissa rakenteissa, kuten seinissä ja alapohjissa.

Laskennassa arvioitiin PVC-kattoon kohdistuvia kosteuskuormia ja katon kuivumiskykyä. Tarkastelu tehtiin tasapainotilanteessa käsinlaskennalla sekä aikariippuvasti elementtimenetelmällä. Katevuodoilla tai konvektiolla sisäilmasta kattoon siirtyvät kosteushuomautukset ovat helposti niin suuria, ettei tuulettamaton PVC-katto pysty poistamaan kosteutta lyhyessä ajassa. Kosteuskonvektio oli laskennassa suurinta höyrystulussa olevista rei'istä ja liittymien raoista. Katevuodoissa vuoden aikana tapahtuvaa konvektiota vastaava kosteushuomautus voi siirtyä kattoon jo puolen tunnin aikana. Sisäilmasta kattoon siirtyvät kosteusvirrat ovat diffuusiolla pieniä, enimmillään $0,17 \text{ kg/m}^2$ vuodessa. Diffuusiolla tapahtuva kuivumisnopeus ulkoilmaan on noin $0,25 \text{ kg/m}^2$ vuodessa ja uratuuletuksella $1 - 16 \text{ kg/m}^2$ vuodessa. Uratuuletuksen vaikutus lämmönsiirtymiseen on vähäinen, noin 1,5 % johtumishäviöstä. Tulokset vastasivat aiempia tutkimuksia. Laskennallisessa tarkastelussa hyödynnettiin kenttämittauksessa mitattuja tuloksia, kuten lämmöneristeen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta, mikä lisää tulosten pätevyyttä. Laskentoihin sisältyy kuitenkin aina yksinkertaistuksia, mitkä aiheuttavat laskentavirhettä.

Elementtimenetelmään perustuvassa laskennalla mallinnettiin kenttätutkimuksen kattorakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa Wufi 4 ja Comsol Multiphysics 4.2 -ohjelmilla. Mallinnuksessa huomioitiin hystereesi ja sorptiokäyrän lämpötilariippuvuus. Lämpötilariippuva sorptiokäyrä paransi hieman kosteudensiirtymisen tarkkuutta. Kuivumislaskelmissa voidaan tulosten perusteella käyttää yksinkertaista sorptiokäyrää. 6 vuoden mittaisten kuivumislaskelmien perusteella PVC-katon hygroskooppinen kosteus kuivuu diffuusiolla 1 - 1,5 vuodessa. EPS:llä eristetty katto kuivuu hieman kivivillaista kattoa hitaammin. EPS:llä lämmöneristetyillä katoilla kesäpäivänä tapahtuva pystysuora kosteudenliike on hieman vähäisempää kuin kivivillalla.

Tutkimus tehtiin pääasiassa kivivillalla eristetyille PVC-katolle, mutta tuloksia voidaan soveltaa tapauskohtaisesti muilla lämmöneristeillä eristettyihin kattoihin. 8 kuukauden mittainen kenttämittauksen sisälsi sekä kesä- että talviajan mittaustuloksia, joten tuloksissa on havaittavissa katon kosteuskäyttäytyminen eri vuodenaikoina. Monen vuoden mittausjakso olisi kuitenkin luotettavampi katon kuivumiskykyä arvioitaessa. Tutkimusalueiden pinta-alat olivat $200 - 400 \text{ m}^2$, mikä saattoi alentaa kattojen kermin hulumamisesta johtuvaa kosteuden tasaantumista. Katon kuivumisnopeuden riittävyyden arvioimiseksi tarvitaan lisätietoa muun muassa kivivillan pitkäaikaisesta kosteudenkestävyydestä.

LÄHDELUETTELO

1. Kosteus- ja hometalkoot. Ympäristöministeriö. Projekti. 2010–2014. Internet sivut: www.hometalkoot.fi
2. Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumis-tutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti, Ilmatieteen laitos, Raportteja 2009:4.
3. RakMK C2. Kosteus. Määräykset ja ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. 1998. 16 s.
4. RIL-155. Lämmön- ja kosteudeneristys. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 1984. 389 s. ISBN 951-758-044-4. ISSN 0356-9403.
5. Protan asennuskäsikirja. Protan Oy. 2007. 105 s.
6. Toimivat Katot 2007. Kattoliitto ry. 2007. 76 s. Saatavissa: www.kattoliitto.fi/index.phtml?s=2
7. RT N-37637 Protan vesikatteet. Protan Oy. 2008. 6 s.
8. Nieminen, J., Ojanen, T. Ventilated roof. Critical performance parameters. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Report VTT-R-03394-06. 2006. 20 s.
9. Humi-Group Oy, Vahanen Oy. Loivan katon kosteus- ja lämpötekkinen tutkimus. 2007.
10. Hovi, V. Loivien kermieristettyjen kattojen kosteuskäyttäytyminen eri rakenneratkaisuissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 2009. 72 s.
11. Noreng, K. et al. Damp in compact roofs. SINTEF Byggforsk. 2008. 39 s.
12. Noreng, K. & Uvslokk, S. Robuste kompakte tak med luftekanaler i isolasjonssjiktet og okt selvuttorkingsevne. Prosjektrapport 63. SINTEF Byggforsk .2010. 32 s.
13. Insinööritoimisto Mikko Vahanen Oy. Joensuun Areena. Yläpohjarakenteen kostustekkinen toimivuus. Lausunto 2003.

14. Samuelson, I. Fukt i utvändigt isolerade plåttak. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund. Report 67. 1976. 169 s.
15. RIL 107–2000 Rakennusten veden- ja kosteudeneristämisohteet.
16. Nieminen, J., Kouhia, I. Hyvin eristetyin loivan katon toimivuus ja vaatimukset. VTT tiedotteita 1979. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 1999. 37 s.
17. Thermisol EPS –vesikattorakenteen suunnitteluohje. Thermisol Oy. 2002. 18 s. Saatavissa: www.thermisol.fi/assets/files/Eriste_Asennus-%20ja%20suunnitteluohjeet/EPS_vesikattorakenteen_suunnitteluohje.pdf
18. Cengel, Y. Heat transfer: a practical approach. 2002. 1006 s. 2. painos. ISBN 0-07-115223-7.
19. Nevander, L., Elmarsson, B. Fukthandbok. Praktik och teori. Svensk Byggtjänst. 2008. 538 s. 3. painos. ISBN 978-91-7333-156-2.
20. Laine, K. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2010.
21. RT 36-10689. Mineraalivillaeristeet. Lämmöneristystarvikkeet. Rakennustieto Oy. 1999.
22. RT 38130 EPS-lämmöneristeet. EPS-rakennuseristeteollisuus. Rakennustieto Oy. 2011.
23. RT 36-10691. XPS-eristeet. Lämmöneristystarvikkeet. Rakennustieto Oy. 1999.
24. Vinha, J. et al. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto. Talonrakennustekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 129. 2005. 101 s. ISBN 952-15-1378-0. ISSN 1459-4102.
25. Wufi-ohjelma. Materiaalikirjasto. Fraunhofer Institute of Building Physics. Holzkirchen.
26. RakMK C3. Rakennusten lämmöneristys. Määräykset 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. 2010. 10 s.
27. Kuntsi, S. Katot ja vedeneristys. Opetushallitus. 1998. 116 s. ISBN 951-664-005-2.

28. Protan Oy. Lämpötilaolosuhteet vesikatteessa ja tasakatoissa. 2005. 2 s. Saatavilla www.protan.fi
29. Murphy, M. et. al. Cool roofing in cold climates: A contradiction or a potential for energy savings?. NSB 2011, 9th Nordic Symposium on Building Physics. Proceedings, Volume 1. s.173 - 179.
30. Ilmatieteenlaitos. 2012. Sadetta ja poutaa. [Internet sivut]. [Viitattu 2.1.2012]. Saatavissa: ilmatieteenlaitos.fi/sade.
31. Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikka. Kurssin Rakennusfysiikan perusteet kaavakokoelma. 22 s.
32. Nevander, L-E., Samuelson, I. Elementär byggnadsfysik. Lund tekniska högskolan. 1976. 161 s.
33. SFS-EN 1991-1-4. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Tuulikuormat.
34. Suomen Tuuliatlas. Saatavilla: www.tuuliatlas.fi/fi/index.html
35. Kloch, N. A new method for drying out lowpitched cold deck roofs. NSB 2011, 9th Nordic Symposium on Building Physics. Proceedings, Volume 1. s.223-229.
36. Künzeli, H. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Väitöskirja. Fraunhofer Institute of Building Physics. Holzkirchen. 1995. 65 s.
37. Ilmatieteenlaitoksen internetsivut. [Viitattu 23.9.2011]. Saatavissa: ilmatieteenlaitos.fi/vahalumiset-ja-lumipeite-ajat.
38. Rode, C., Hansen, K. Hysteresis and Temperature Dependency of Moisture Sorption – New Measurements. NSB 2011, 9th Nordic Symposium on Building Physics. Proceedings, Volume 2. s.647.
39. Ahlgren, L. Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund. Report 36. 1972. 130 (+70) s.
40. Hagentoft, C-E. Introduction to building physics. Lund, Studentlitteratur. 2001. 422 s. ISBN 91-44-01896-7.
41. Vainio, H. ym. Kattoliiton pienryhmän kokous 14.11.2011. Muovisten ja kumisten katteiden käyttöluokat ja rakenteen tuuletus.

42. Paroc Oy. [Internet sivut]. [Viitattu 23.11.2011]. Saatavilla: www.paroc.fi/channels/fi/do-it-yourself/design+guidelines/moisture/default.asp
43. Viitanen, H. Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet – betonin homeenkesto.
44. Lehtinen, T., Viljanen, M. Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen suunnittelu. Teknillinen korkeakoulu. Talonrakennustekniikan laboratorio. Julkaisu TKK-TRT-119. 2001. 30 s. ISBN 951-22-5579-0. ISSN 1456-4297.
45. Ilmatieteenlaitos. 2012. Vähälumisia talvia. [Internet sivut]. [Viitattu 2.1.2012]. Saatavissa: ilmatieteenlaitos.fi/vahalumiset-talvet.
46. Ilmatieteenlaitos. 2012. Talvien lumista ja lumisuudesta. [Internet sivut]. [Viitattu 2.1.2012]. Saatavissa: ilmatieteenlaitos.fi/lumitilastot.
47. Oumeziane, Y-A. et al. Hygrothermal behavior of a hemp concrete wall: influence of sorption isotherm modelling. NSB 2011, 9th Nordic Symposium on Building Physics. Proceedings, Volume 2. s.567 - 574.
48. RT 38135. Rakennuseristeet, Kattoeristeet, Julkisivueristeet. [RT-kortti]. Rock-wool Finland Oy. 2011.
49. Wufi Pro 4.2 online help. Topic 20. Membranes. Saatavissa Wufi-4 ohjelman apuosiossa. Fraunhofer Institute of Building Physics.
50. Wufi Pro 4.2 online help. Topic 14. Moisture Storage Function. Saatavissa Wufi-4 ohjelman apuosiossa. Fraunhofer Institute of Building Physics.
51. Lukkarinen, S. Heat, Air and Moisture -laskentamalli Comsol Multiphysics ohjelmistolla. 2010. (Ei julkaistu)

LIITTEET

LIITE 1. Tuuletusuran ilman lämpötilan laskeminen	s.133
LIITE 2. Tuloksia kenttäkokeesta	s.137
LIITE 3. Uratuuletuksen toimivuus aiemmassa tutkimuksessa	s.144
LIITE 4. Teoriaa lämpö- ja kosteusteknisestä laskentamallista	s.145
LIITE 5. Comsol Multiphysicsin parametrit ja muuttujat sekä tuloksia laskentamalleista 1 - 5.	s.148

LIITE 1. Tuuletusuran ilman lämpötilan laskeminen

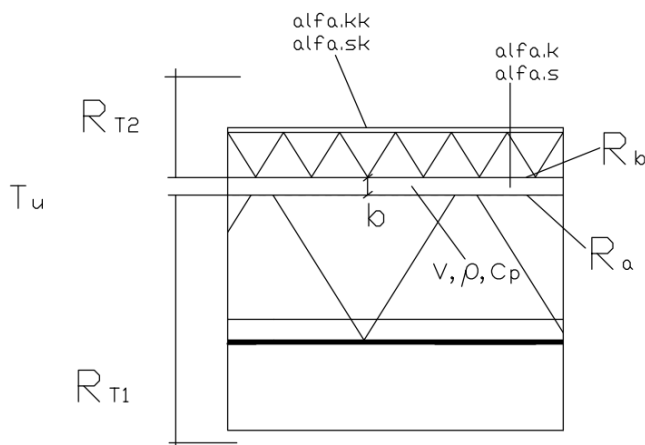
Katossa olevan tuuletusvälin lämpötilajakauman laskentaperiaate on esitetty lähteessä [14, s.440–445]. Lämpötilajakauma etäisyydellä x [m] sisäänvirtausaukosta saadaan kaavalla 53.

$$T(x) = T_0 - (T_0 - T_u) * e^{-kx} \quad \text{A.}$$

missä T_0 on tuulettumattoman ilmaraon lämpötila [$^{\circ}\text{C}$], T_u on ulkolämpötila [$^{\circ}\text{C}$] ja k on laskentaparametri [$1/\text{m}$], joka kuvaa kuinka nopeasti ilman lämpötila tasaantuu urassa. k lasketaan kaavalla 54.

$$k = 1/\rho c b v R \quad \text{B.}$$

missä ρ on ilman tiheys [kg/m^3], c on ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK], b on uran korkeus [m], v on ilman nopeus urassa [m/s] ja R on lämmönvastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]. Laskentasuureet on kuvattu kuvassa 88.



Kuva 85. Tuuletusuran ilman lämpötilan laskennassa tarvittavia suureita.

Lämmönvastukset saadaan kaavoilla 55 - 59.

$$R = R_b + 1/(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) \quad \text{C.}$$

$$R_b = \frac{\alpha_s}{\alpha_k} R_a \quad \text{D.}$$

$$R_a = \frac{1}{\alpha_s + 2\alpha_k} \quad \text{E.}$$

$$R_1 = R_a + R_{T1} \quad \text{F.}$$

$$R_2 = R_b + R_{T2} \quad \text{G.}$$

missä α_s ja α_k ovat lämmönsiirtokertoimet tuuletusurassa. Kaavassa 53 tarvittava lämpötila T_0 saadaan kaavalla 60.

$$T_0 = \frac{R_1 T_e + R_2 T_s}{R_1 + R_2} \quad \text{H.}$$

Kaavassa 60 tarvittava T_e on ekvivalentti ulkolämpötila. Se voidaan laskea kaavalla 61.

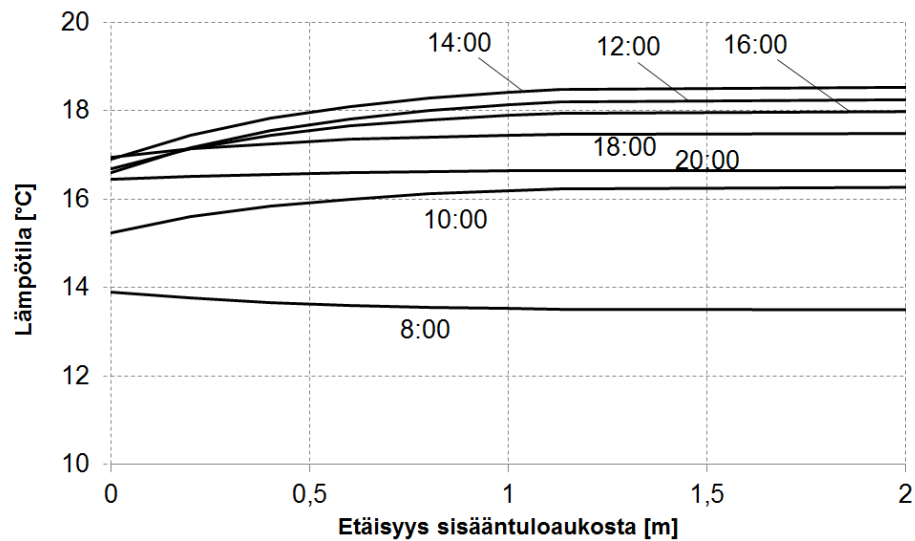
$$T_e = T_u + \frac{\alpha_{sk}}{\alpha_{sk} + \alpha_{kk}} (T_{tvs} - T_u) + \frac{aI}{\alpha_{sk} + \alpha_{kk}} \quad \text{I.}$$

missä α_{sk} ja α_{kk} ovat lämmönsiirtokertoimet [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] katteen päällä, T_{tvs} on taivaan vastasäteilylämpötila, a on lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin [-] ja I on auringon säteilyintensiteetti katolle [W/m^2]. PVC-katon tuuletusuran lämpötilajakauma arvioitiin taulukossa 19 esitetyillä laskentaparametreilla.

Taulukko IA. Uran lämpötilan laskennassa käytetyt parametrien arvot.

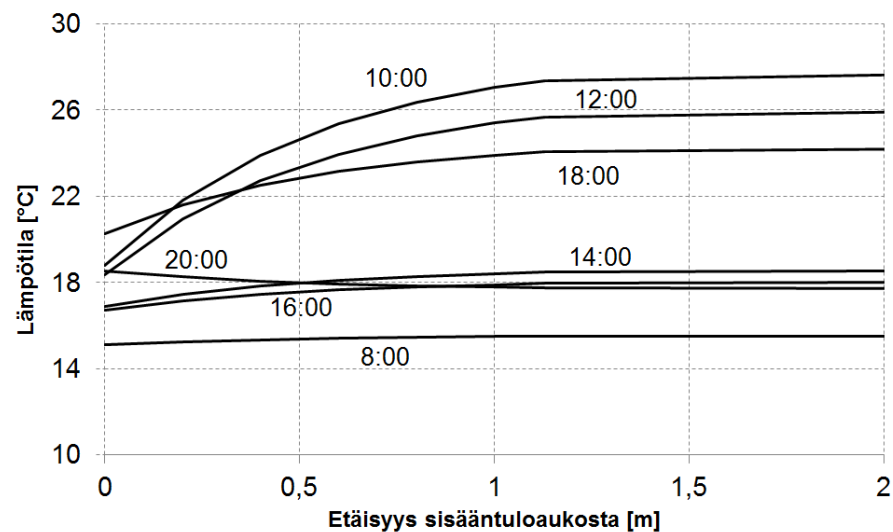
parametri	arvo	yksikkö	selite
alfa.k.kate	18	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	$6+4*3=18$ (3m/s tuulennopeus)
alfa.s.kate	4	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	yhdensuuntaiset pinnan, $T_p=20\text{ °C}$, $T_{tvs}=5\text{ °C}$, res.em.kerroin ₁₂ =0,818
alfa.k.ura	2	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Lähteestä [14, s.442]
alfa.s.ura	4,5	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Lähteestä [14, s.444]
M2	1,44	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$	50 mm kivivilla, alfa.kok 20 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
M1	5,48	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$	180 mm kivivilla, 400 betoni, alfa.kok 10 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
T_{tvs}	$T_u(\text{mit})-10$	°C	Kenttätutkimuksen ulkolämpötila miinus 10 °C [14, s.319] Taivaan alilämpö vaihtelee välillä 8-16 °C
I	mit.	W/m^2	Kenttätutkimuksen perusteella laskettu intensiteetti
a	1	-	Absorptiokerroin otettiin huomioon säteilyintensiteetissä.
$v.ura$	0,05	m/s	Lähteen [5] mukaan keskimääräinen nopeus tuuletusurassa

Kuvassa 75 on esitetty laskettu uran ilman lämpötila etäisyyden funktiona sisääntuloaukosta 15.7 eri vuorokaudenaikoina. Lämpötila nousee nopeasti sisäänvirtausaukon jälkeen tasapainotilaansa.



Kuva 1A. Ilman lämpeneminen tuuletusurassa tapahtuu metrin matkalla sisäänvirtauksesta.

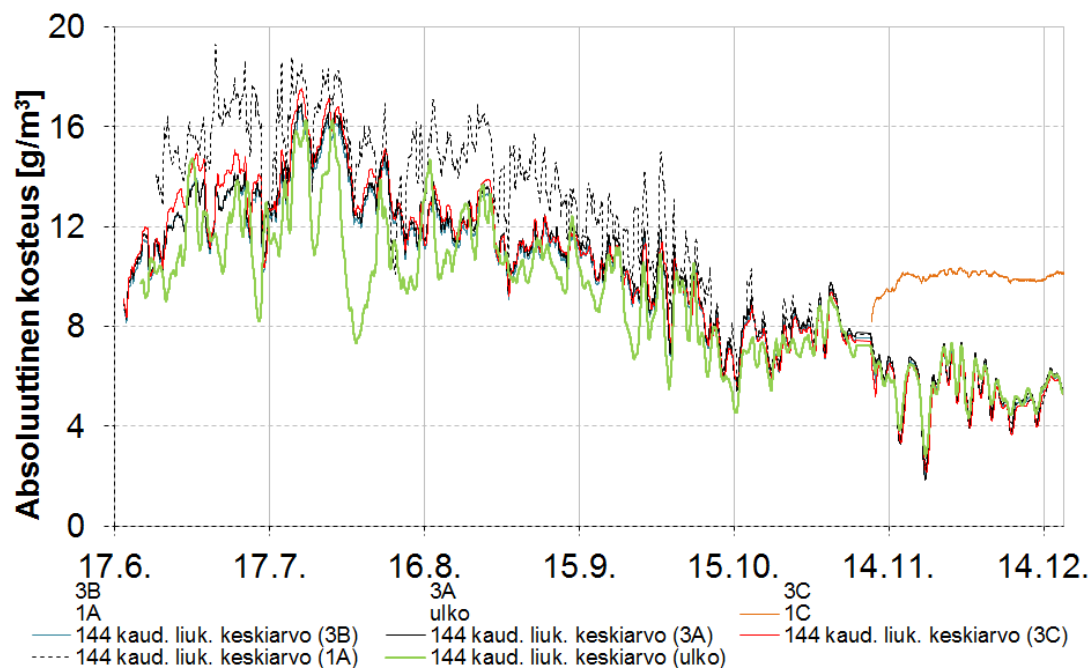
Aurinkoisena päivänä 16.7. uran lämpötilan muutos on voimakkaampi



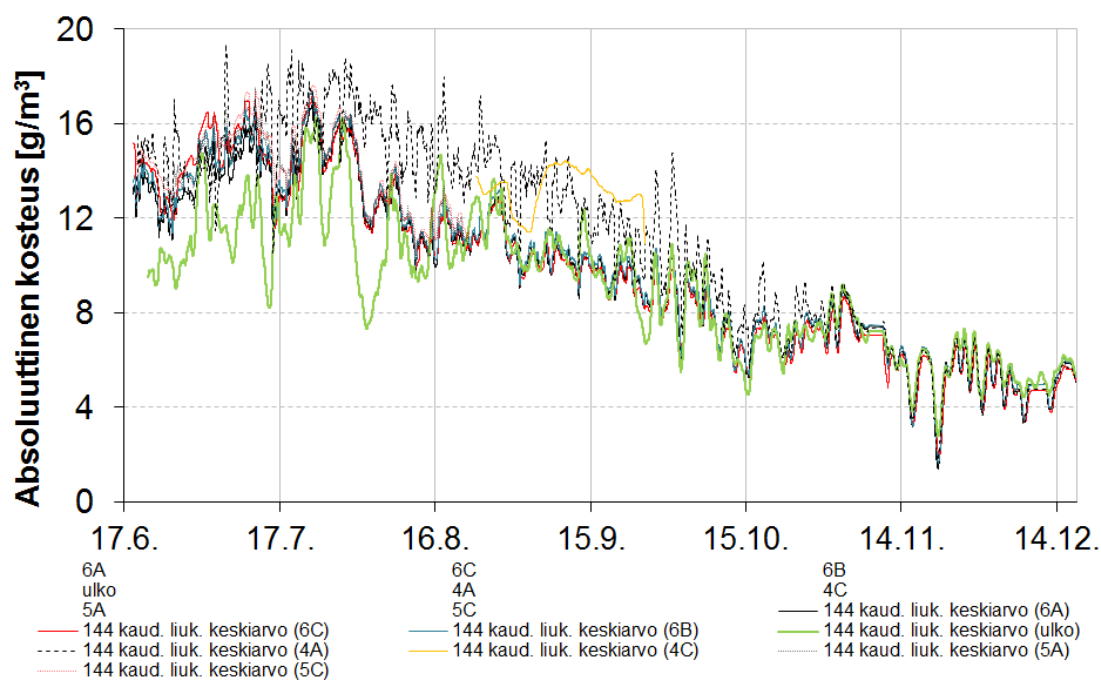
Kuva 1B. Urassa virtaavan ilman lämpeneminen on voimakkaampaa lämpimänä päivänä.

Tarkastelu ei ota huomioon uran sivusuuntaista lämpövirtaa, joka vaikuttaa voimakkaimmin heti sisäänvirtauksessa. Uran ilman lämpeneminen tapahtuu todellisuudessa esitettyä nopeammin.

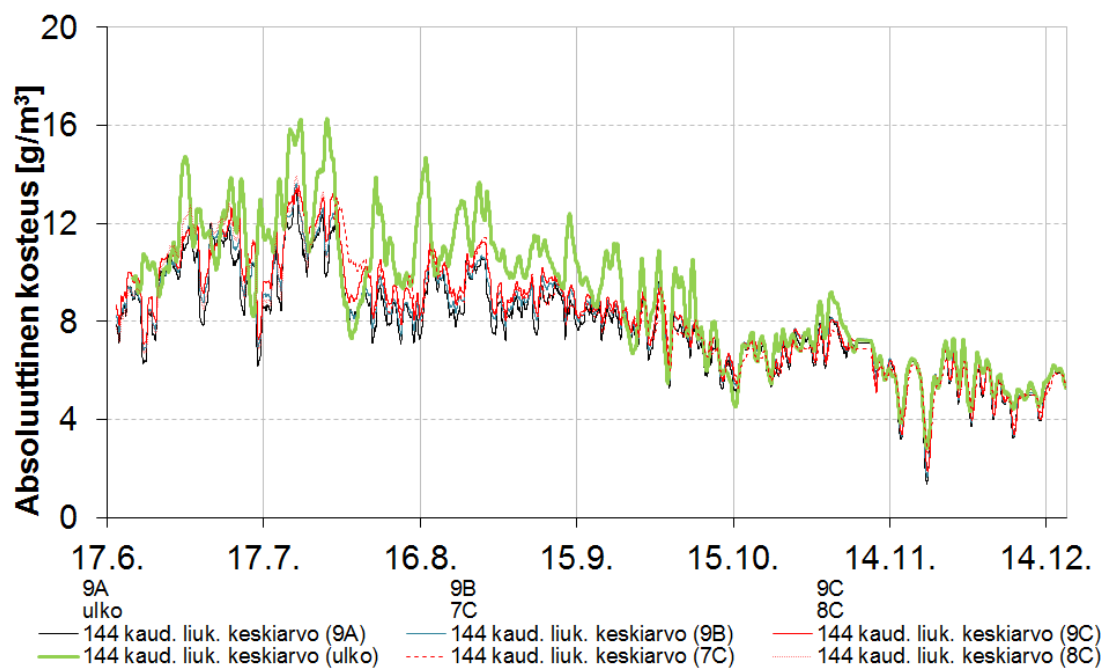
LIITE 2. Tuloksia kenttäkokeesta



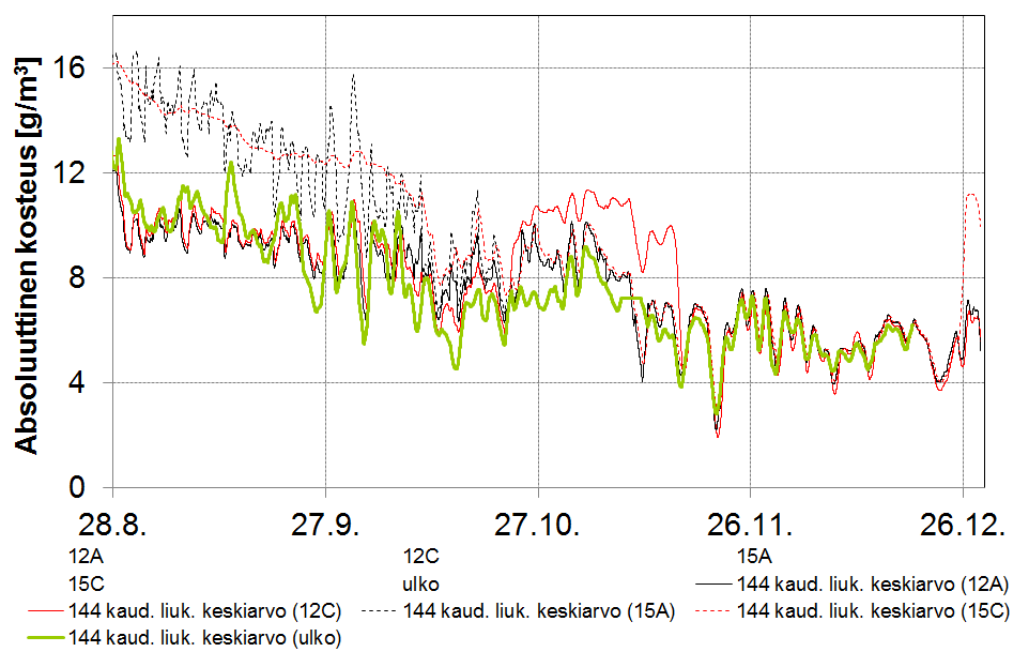
Kuva 2A. Absoluuttinen kosteus tutkimusalueella 1.



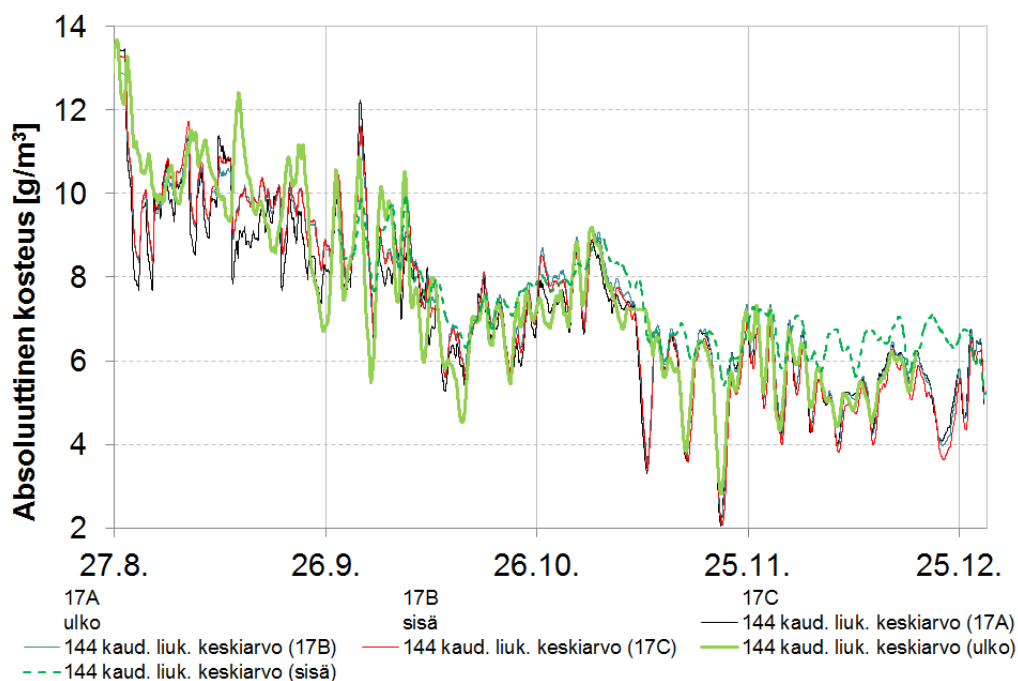
Kuva 2B. Absoluuttinen kosteus tutkimusalueella 2.



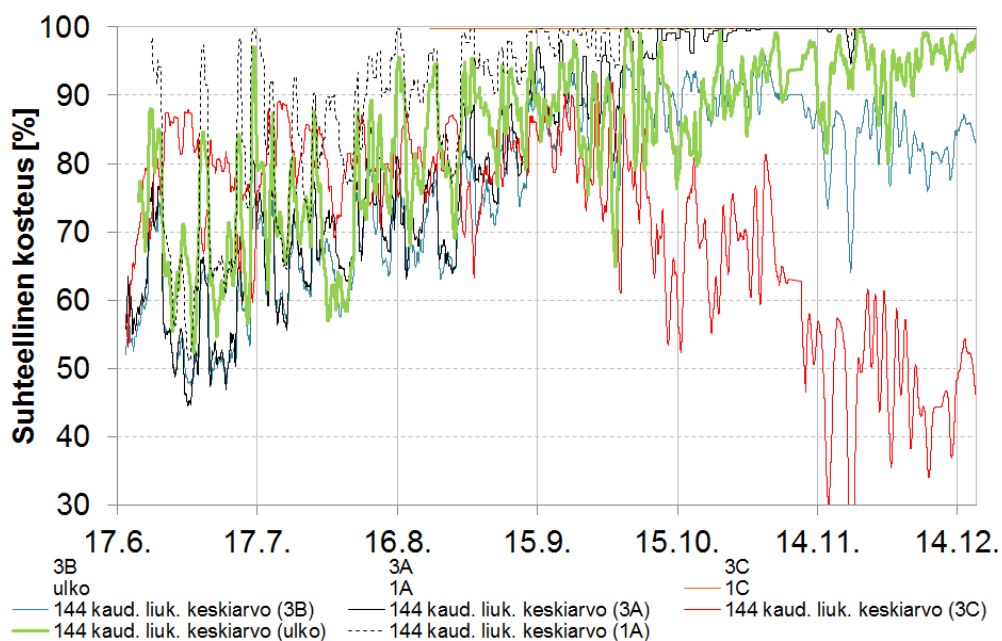
Kuva 2C. Absoluuttinen kosteus tutkimusalueella 3.



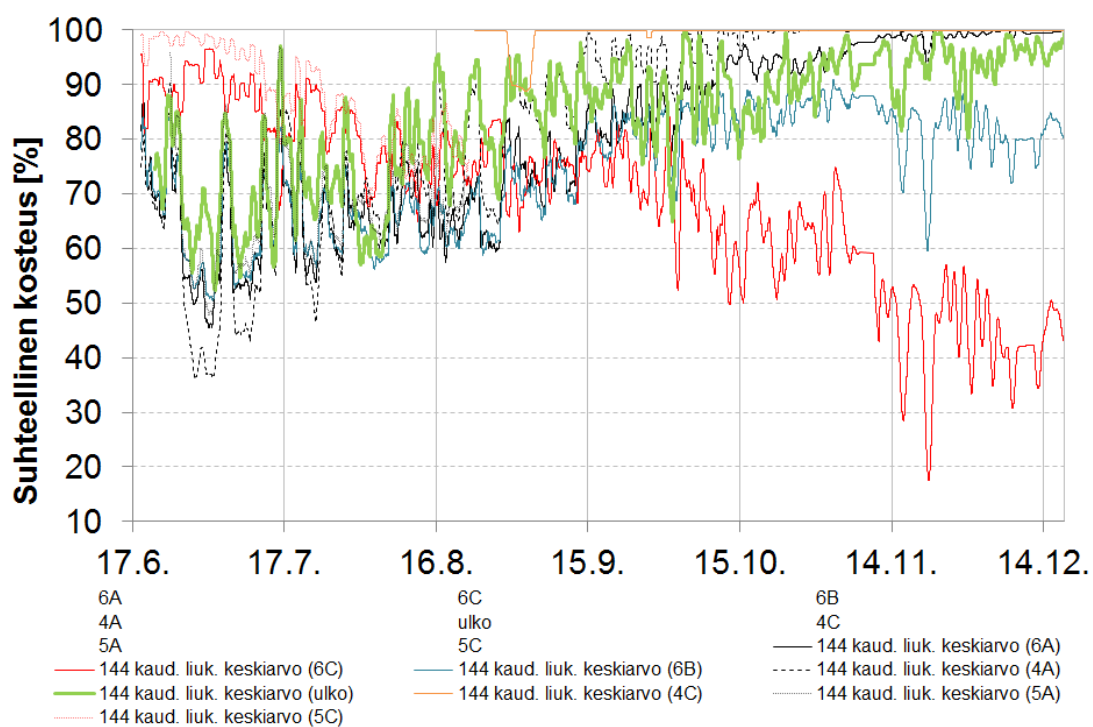
Kuva 2D. Absoluuttinen kosteus tutkimusalueella 4.



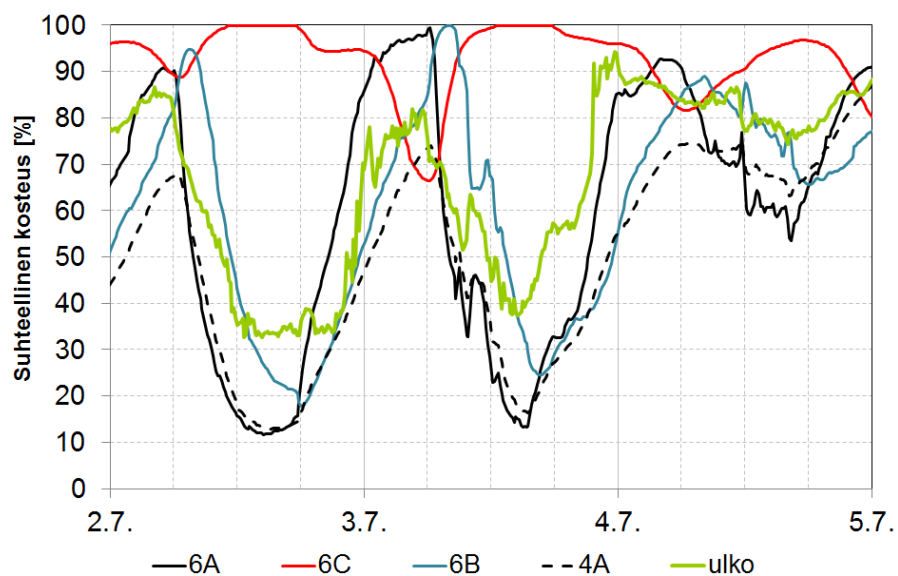
Kuva 2E. Absoluuttinen kosteus tutkimusalueella 5.



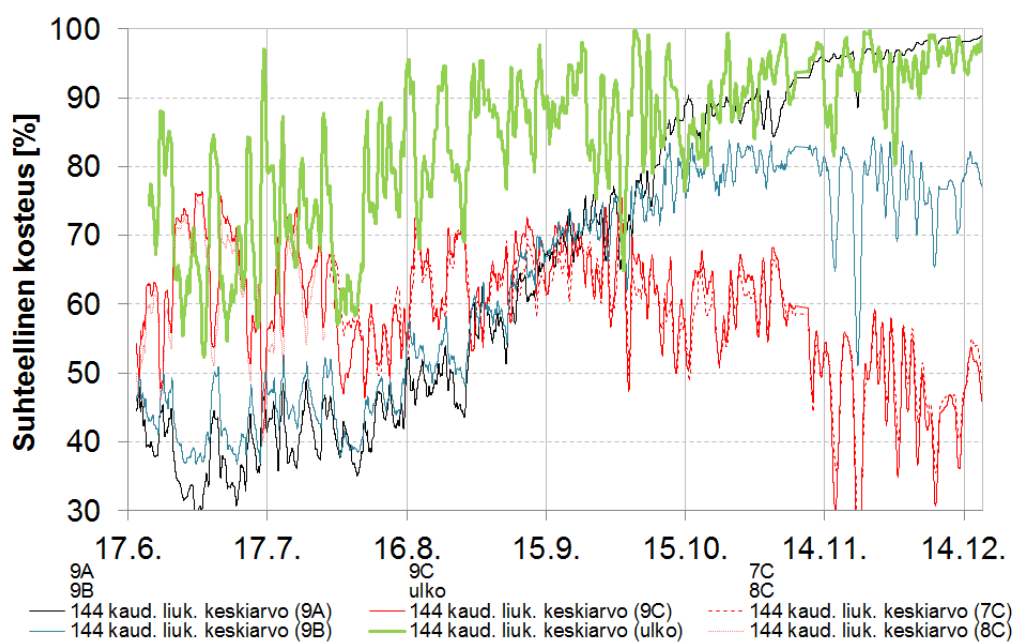
Kuva 2F. Suhteellinen kosteus tutkimusalueella 1.



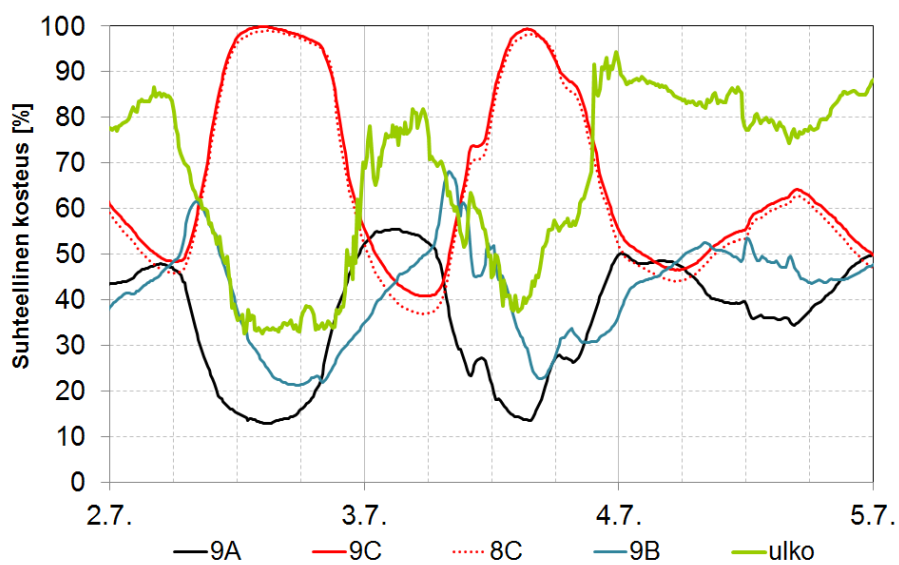
Kuva 2G. Suhteellinen kosteus tutkimusalueella 2.



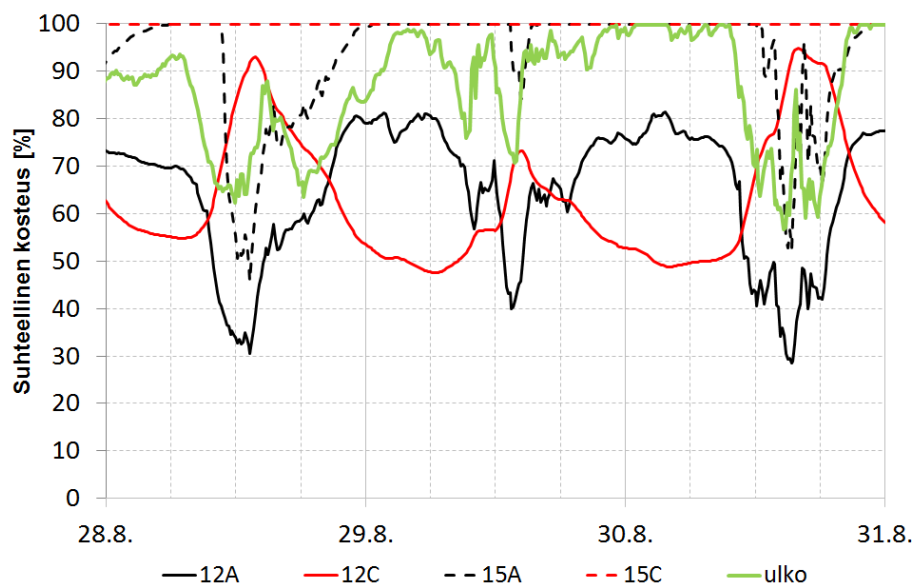
Kuva 2H. Suhteellinen kosteus tutkimusalueella 2 heinäkuussa.



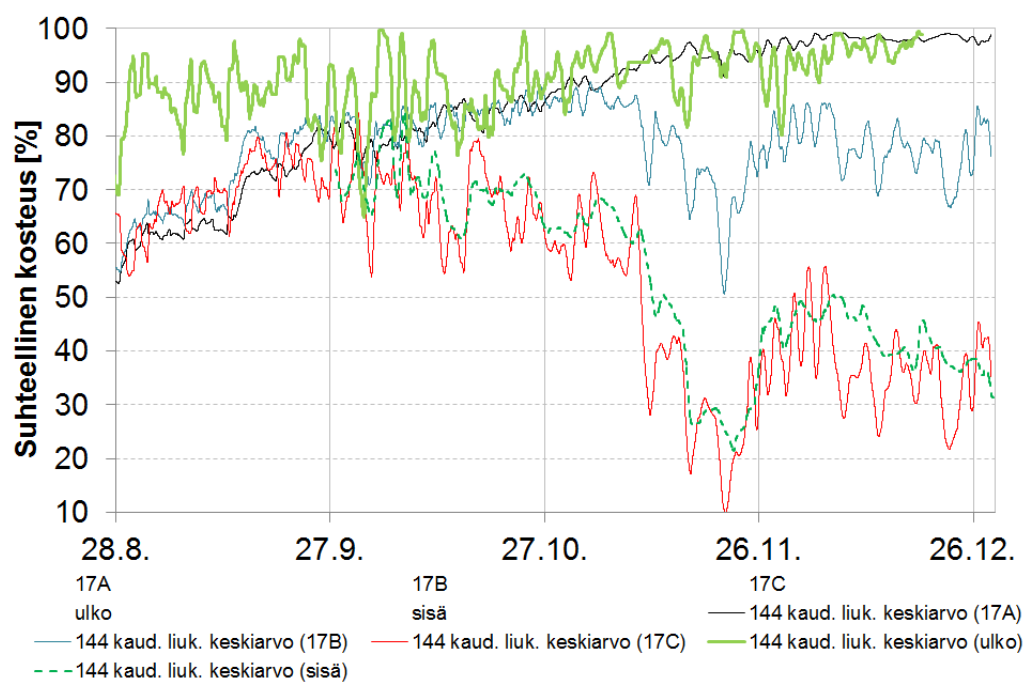
Kuva 2I. Suhteellinen kosteus tutkimusalueella 3.



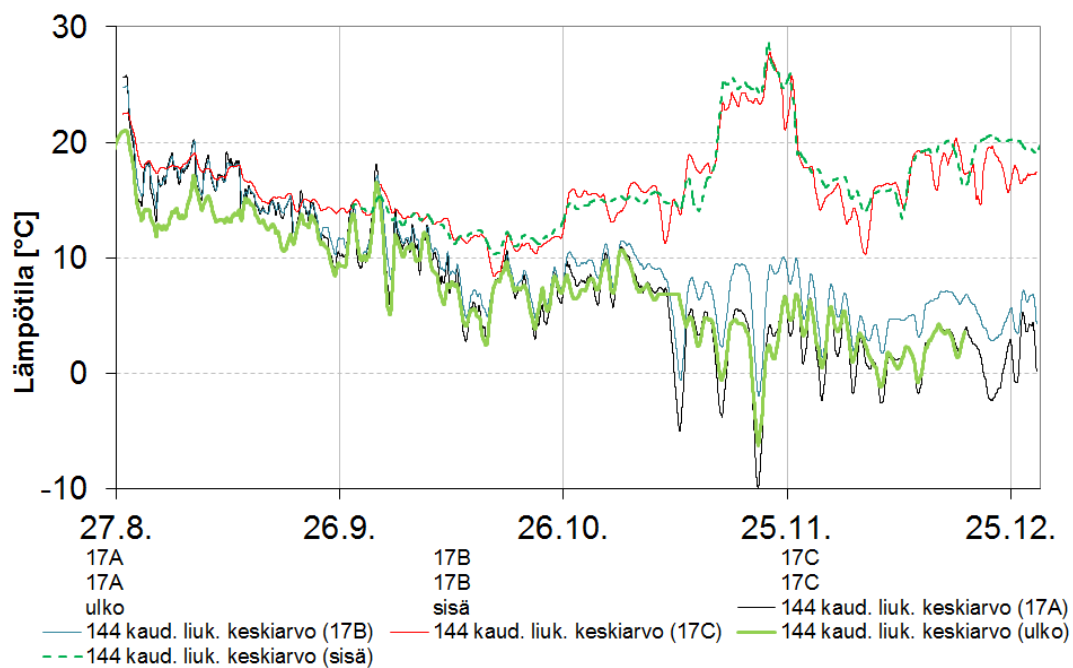
Kuva 2J. Suhteellinen kosteus alueella 3 heinäkuussa.



Kuva 2K. Suhteellinen kosteus alueella 4 elokuussa.



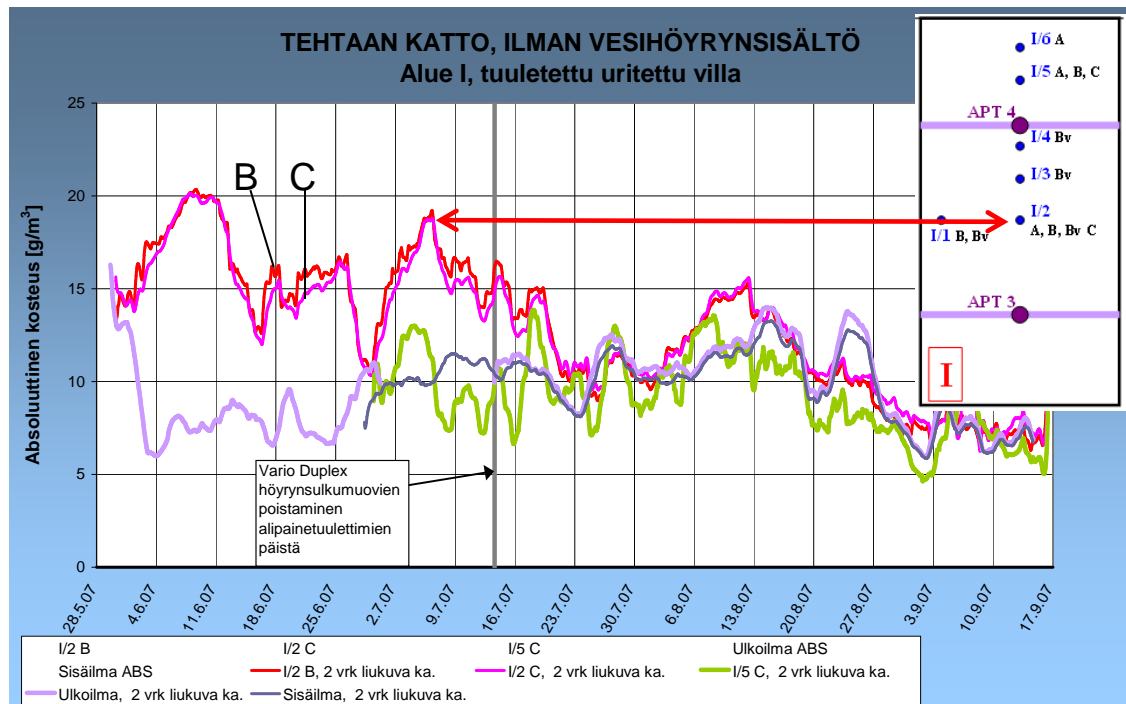
Kuva 2L. Suhteellinen kosteus tutkimusalueella 5.



Kuva 2M. Lämpötila tutkimusalueella 5.

LIITE 3. Uratuuletuksen toimivuus aiemmassa tutkimuksessa

Kuvassa 3A on esitetty bitumikattotutkimuksessa mitattuja absoluuttisia kosteuksia uratuuletetusta katosta. Kuvan yläkulmassa on esitetty mittausalue. Mittausalue oli kooltaan $4,8 \times 14 \text{ m}^2$. Kokoojakanavat olivat 150 mm leveät ja urien koko $15 \times 12 \text{ mm}^2$ (leveys x korkeus). Lämmöneriste oli 60 mm (uritettu) + 170 mm lasivillaa.



Kuva 3A. Uratuuletetun katon mitattu absoluuttinen kosteus bitumikattotutkimuksessa [9]. Pystyviiva kuvaa tuuletuksen avaamishetkeä.

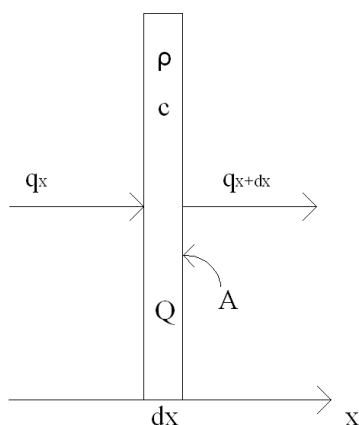
Mittauksen perusteella uratuuletus alentaa lämmöneristeen absoluuttisen kosteuden ulkoilman tasolle 1 - 2 viikon aikana.

LIITE 4. Teoriaa lämpö- ja kosteusteknisestä laskentamallista

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden analysoinnissa käytetyissä laskentamalleissa lasketaan samanaikaisesti lämmön- ja kosteudensiirtymistä. Nämä ilmiöt voidaan kuvata yhtälöillä, joita kuvataan tässä liitteessä.

Lämmönsiirtymisen mallintaminen energiataselaskennalla

Lämpötasapainoyhtälö voidaan johtaa kuvan 4A perusteella [12, s.68 - 69]. Yhtälön johtamiseksi tarkastellaan differentiaalista elementtiä, jonka reunoilla vaikuttaa lämpövirrat q_x ja q_{x+dx} . Elementin leveys on dx [m], tiheys on ρ [kg/m³], ominaislämpökapasiteetti on c [J/kgK], lämmöntuotto on Q [W] ja pinta-ala on A [m²] lämpövirtaa kohtisuoraan olevassa tasossa.



Kuva 4A. Differentiaalinen elementti, johon vaikuttavien lämpövirtojen avulla voidaan johtaa lämpötasapainoyhtälö.

Energian säilymisen perusteella saadaan yhtälö A.

$$q_x - q_{x+dx} + Q = \frac{dE}{dt} \quad \text{A.}$$

$$q_x - q_{x+dx} + \dot{q}Adx = \rho cAdx \frac{T_{t+dt} - T_t}{dt} \quad \text{B.}$$

$$\frac{q_x - q_{x+dx}}{Adx} + \dot{q} = \rho c \frac{T_{t+dt} - T_t}{dt} \quad \text{C.}$$

$$-\frac{q_{x+dx} - q_x}{A dx} + \dot{q} = \rho c \frac{T_{t+dt} - T_t}{dt} \quad \text{D.}$$

$$-\frac{dq}{A dx} + \dot{q} = \rho c \frac{T_{t+dt} - T_t}{dt} \quad \text{E.}$$

Fourierin laki lämmönjohtumisesta:

$$q = -kA \frac{T_{x+dx} - T_x}{dx} \quad (W) \quad \text{F.}$$

Sijoitetaan yhtälö (F) yhtälöön (E):

$$-\frac{d}{A dx} \left(-kA \frac{T_{x+dx} - T_x}{dx} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{T_{t+dt} - T_t}{dt} \quad \text{G.}$$

Ottamalla raja-arvot $dx \rightarrow 0$ ja $dt \rightarrow 0$ saadaan:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{H.}$$

Kun lämmönjohtavuus k on vakio, saadaan yhtälö I.

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{I.}$$

Yhtälö voidaan esittää myös muodossa:

$$-\nabla q + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \left(\frac{W}{m^3} \right) \quad \text{J.}$$

missä $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}$ yksiulotteisessa koordinaatistossa. Yhtälö I voidaan myös sieventää muotoon:

$$-\nabla^2 T = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{q} \quad \text{K.}$$

Kosteuden diffuusion laskenta massansiirron ja lämmönsiirron analogialla

Kosteudensiirtyminen diffuusiolla voidaan laskea lämmönsiirtymistä kuvaavaa yhtälöä vastaavalla yhtälöllä, sillä massansiirtymisen (kosteudensiirtymisen) ja lämmönsiirtymisen välillä pätee analogia [12, s.719]. Massansiirtymisessä lämpötilaeroa vastaa konsentraatioero. Kosteudensiirtymisyhtälö on muotoa [10, s.302]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + g = \frac{\xi(\varphi)}{v_{kr}} \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{L.}$$

missä δ_v on vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s], v on vesihöyrypitoisuus [kg/m^3], g on kosteustuotto [$\text{kg}/\text{s}/\text{m}^3$], $\xi(\varphi)$ on sorptiokäyrän kulmakerroin ja v_{kr} on kriittinen vesihöyrypitoisuus. Kun kosteudenläpäisevyys δ_v on vakio yhtälö saa muodon:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{1}{D_v} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{g}{\delta_v} \quad \text{M.}$$

missä $D_v = (v_{kr} * \delta_v) / \xi(\varphi) = \text{kosteuden diffusiviteetti}$ [m^2/s]. Yhtälöt L ja M voidaan esittää myös muodoissa:

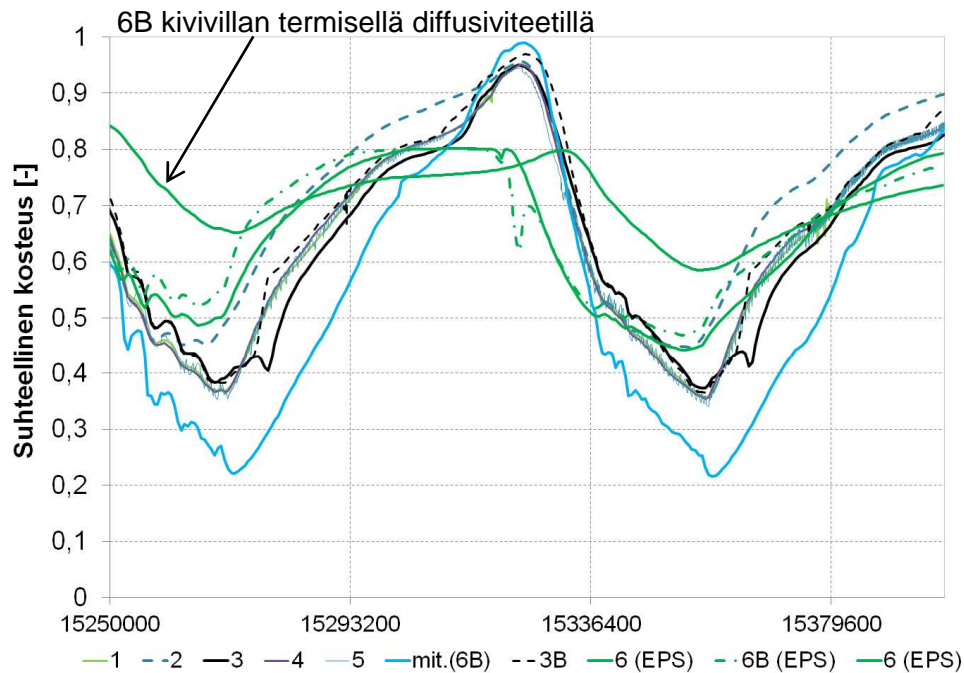
$$\nabla * (\delta_v \nabla v) = \frac{\xi(\varphi)}{v_{kr}} \frac{\partial v}{\partial t} - g \quad \text{N.}$$

$$\nabla^2 v = \frac{1}{D_v} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{g}{\delta_v} \quad \text{kun } \delta_v \text{ on vakio} \quad \text{O.}$$

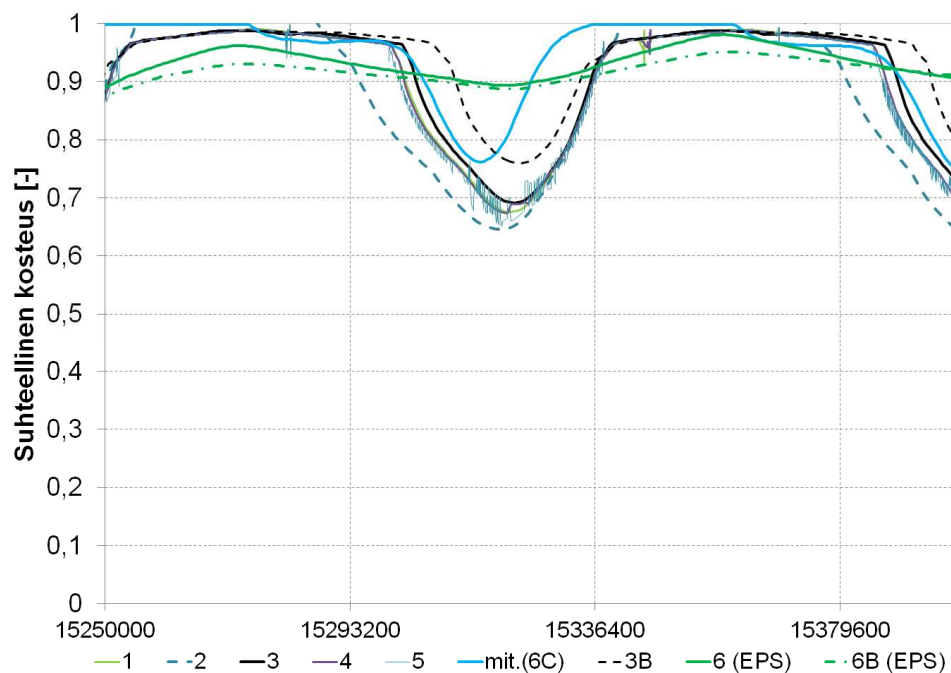
LIITE 5. Comsol Multiphysicsin parametrit ja muuttujat sekä tuloksia laskentamalleista 1 - 5.

Taulukko 5A. Laskentaohjelmaan syötetyt parametrit ja muuttujat.

Parametri	Kuvaus	Arvo	Yksikkö	Lähde/Peruste
alfa _u	ulkopinnan lämmönsiirtokerroin	25	W/m ² /K	[19 s.16]
alfa _s	sisäpinnan lämmönsiirtokerroin	10	W/m ² /K	[19 s.16]
beta _s	sisäpinnan massasiirtokerroin	0,007968	m/s	alfa _s /1255 (kaava 51)
beta _u	ulkopinnan massasiirtokerroin	0,01992	m/s	alfa _u /1255 (kaava 51)
T _{init}	materiaalien alkulämpötila	17,7	°C	valittu
RH _{init}	materiaalien suhteellinen kosteus alussa	0,50-1,00	-	
M _w	veden molekyylipaino	18,016	g/mol	
R	yleinen kaasuvakio	8,314	J/mol/K	
R _c	kokeellinen reaktiokerroin	0,001	1/s	[29]
p ₀	ilmanpaine	101325	Pa	
Muuttuja	Kuvaus	Lauseke		Lähde
D _p	vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa, paine	2E-7*((T[K]^0,81)/p _{ymp})		[46, s.15]
D _v	vesihöyryn diffusiviteetti ilmassa, mas- sapitoisuus	D _p *(R _g /M _w)*T		
RH	suhteellinen kosteus	m _v /V _{sat}		
v _u	absoluuttinen kosteus ulkona	RH _u (t)*v _{sat} (T _u)		
v _s	absoluuttinen kosteus sisällä	RH _s (t)*v _{sat} (T _s)		
v _{init}	absoluuttinen kosteus mat. huokosil- massa alussa	RH _{init} *v _{sat} (T _{init})		
w _{init}	hygr. kosteus mat. huokosilmassa alus- sa	w(RH _{init}) tai w(RH _{init} , T _{init})		
p _{sat}	vesihöyryn kyllästyspaine	611*exp(22,44*T[°C]/(272,44+T[°C])) kun T<0 611*exp(17,08*T[°C]/(234,18+T[°C])) kun T>=0		[47]
v _{kr}	vesihöyryn kyllästyskonsentraatio (Työhön kehitetyt muuttujat:)	p _{sat} /(461,4*T[K])		yleinen kaasulaki
urat	uratuuletus	(v _u <v)*urat2		
urat2	uratuuletuksen tehokkuus	-0,0045*(vsat-vu2)		
v _{u2}	ehto uratuuletukselle	(v _u >=v _{sat})*v _{sat} +(v _u <v _{sat})*v _u		
Dw	materiaalin kosteuspitoisuuden derivaat- ta	d(w,t)		
w _{ads_des}	sorptiokäyrä, kosteustilanteesta riippuva	(Dw<0)*w _{des} +(Dw>=0)*w _{ads}		
w(T,RH)	sorptiokäyrä, lämpöriippuva	(T<278.15)*w5+(T>=287.15)*(T<304.6 5)*w23...		



Kuva 5A. Tuloksia suhteellisen kosteuden laskennasta kesäpäivänä B-korkeudella (60 mm katon yläpinnasta) eri laskentamalleilla. Mit(6A) on kenttämittauksesta alueelta 3. Kuvan ajanjakso on 26.6 12:00–28.6 6:00. (Cmsol Multiphysics).



Kuva 5B. Tuloksia suhteellisen kosteuden laskennasta kesäpäivänä C-korkeudella (lämmöneristeen alapinnassa) eri laskentamalleilla. Mit(6A) on kenttämittauksesta alueelta 3. Kuvan ajanjakso on 26.6 12:00–28.6 6:00. (Cmsol Multiphysics).